



João José da Fonseca Marques Simões Dias
Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

Tratamento de solos com cimento para obtenção de melhores características mecânicas

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – perfil construção

Orientador: Prof^a. Doutora Maria Teresa Grilo Santana,
FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Nuno Manuel da Costa Guerra
Arguente: Prof. Doutor Fernando Farinha da Silva Pinho
Vogal: Prof^a. Doutora Maria Teresa Grilo Santana



**FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

Janeiro 2012



João José da Fonseca Marques Simões Dias
Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

Tratamento de solos com cimento para obtenção de melhores características mecânicas

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – perfil construção

Orientador: Prof^a. Doutora Maria Teresa Grilo Santana,
FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Nuno Manuel da Costa Guerra
Arguente: Prof. Doutor Fernando Farinha da Silva Pinho
Vogal: Prof^a. Doutora Maria Teresa Grilo Santana



**FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**

Janeiro 2012

Tratamento de solos com cimento para obtenção de melhores características mecânicas

“Copyright” João José da Fonseca Marques Simões Dias, da FCT/UNL e da UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, quero agradecer à Professora Doutora Maria Teresa Santana pela orientação, acompanhamento permanente e interesse que sempre demonstrou na concretização desta dissertação, pelos conhecimentos, conselhos transmitidos e por toda a disponibilidade demonstrada.

Agradeço também a todas as restantes pessoas que contribuíram para a realização desta dissertação, nomeadamente ao Professor Pedro Lamas pela disponibilidade em ir mostrar o local de recolha do solo, ao professor Luís Quaresma pela bibliografia cedida, ao técnico de laboratório Sr. Gaspar pela ajuda na recolha do solo e à Mariana Silva pelos dados facultados acerca do solo em estudo neste trabalho.

À minha família, aos meus pais, irmã, marido e namorada pelo apoio incondicional dado durante estes meses, pois sem eles muito dificilmente seria realizada esta dissertação.

Em especial quero agradecer ao técnico de laboratório Jorge Silvério por todo apoio dado e ajuda indispensável durante todos os procedimentos do programa experimental realizado neste trabalho.

Não quero deixar de agradecer aos meus colegas de curso e amigos pelo incentivo e apoio transmitidos durante a realização deste trabalho.

RESUMO

Com o presente trabalho, pretende-se dar um contributo para um melhor conhecimento do método de estabilização de solos com cimento. Para o efeito, são descritas as diferentes aplicações deste material, os respectivos mecanismos envolvidos e os factores que afectam as propriedades dos solos estabilizados com cimento. São estudadas misturas de solo-cimento que são utilizadas principalmente na construção de bases e sub-bases para pavimentos rodoviários em Portugal.

O programa experimental apresentado estuda a influência da quantidade de cimento nas características de resistência e deformabilidade de misturas de solo-cimento, em provetes com duas dosagens diferentes de cimento, compactados no molde Proctor com o teor em água óptimo. Posteriormente realizaram-se ensaios de resistência à compressão simples, sob diferentes tempos de cura.

Os resultados obtidos indicam que o uso de cimento para estabilização de solos é um método que permite obter consideráveis melhorias na resistência mecânica do solo. Para as duas dosagens estudadas verificou-se que quanto maior a percentagem de cimento, maior a resistência obtida. O tempo de cura é fundamental na resistência das misturas de solo-cimento, tendo-se obtido maiores taxas de crescimento de resistência nos 7 dias iniciais. Verificou-se ainda que provetes com maiores teores de cimento apresentaram uma rotura frágil, enquanto nos provetes de solo isolado observou-se uma rotura dúctil.

PALAVRAS-CHAVE: Solo-cimento, Estabilização, Ensaios de resistência à compressão simples

ABSTRACT

The purpose of the present work is to contribute to a better knowledge of the different methods of soil stabilization focusing in the method of the soil stabilized with cement. For this work different applications of this material are described, the involved mechanisms and the factors that affect the properties of stabilized soils with cement. Mixtures of soil-cement are studied specially the ones used for construction of bases and sub-bases for road pavements in Portugal.

The experimental program was carried out to study the influence of the amount of cement on properties in terms of strength of soil cement samples with two different dosages of cement compacted in the Proctor mould using the optimum water content. After that unconfined compression tests were carried out to different curing times.

The results show that the use of cement for soil stabilization is a method that contributes with good improvements in the mechanical strength of the soil. For the two studied dosages the results show that the greater amount of cement the better is the obtained compression strength. The curing time is very important in the strength of soil-cement mixtures and the great increasing strength is obtained in the initial seven days. The results also show that the samples with larger amount of cement displayed a fragile type of failure while in the case of the isolated soil samples it was observed a ductile failure.

KEY-WORDS: Soil-cement, Stabilization, Unconfined compressive strength

ÍNDICE

1	Objectivos, metodologia e organização da dissertação.....	1
1.1	Introdução	1
1.2	Objectivos e metodologia.....	2
1.3	Organização da dissertação	3
2	Estabilização de solos	5
2.1	Considerações gerais.....	5
2.2	Evolução histórica.....	7
2.3	Métodos de estabilização	11
2.3.1	Generalidades	11
2.3.2	Estabilização mecânica.....	11
2.3.3	Estabilização física	12
2.3.4	Estabilização química.....	13
3	Estabilização de solos com cimento.....	15
3.1	Introdução	15
3.2	Mecanismos de estabilização de solos com cimento	17
3.3	Propriedades das misturas de solo-cimento	18
3.3.1	Generalidades	18
3.3.2	Tipo de solo	19
3.3.3	Proporção e condições da mistura	21
3.3.4	Compactação	22
3.3.5	Tempo de cura	23
3.3.6	Presença de aditivos	24
3.4	Resistência à compressão simples.....	25
4	Programa experimental	35
4.1	Introdução	35
4.2	Materiais Utilizados	35
4.2.1	Solo.....	35
4.2.2	Cimento	40
4.2.3	Água	40
4.3	Misturas de solo-cimento	41
4.3.1	Percentagem de cimento adoptada	41
4.3.2	Ensaio de compactação	42
4.4	Moldagem e cura dos provetes.....	45
4.5	Ensaio de resistência à compressão simples	51

5	Análise dos resultados experimentais	53
5.1	Introdução	53
5.2	Teores em água e pesos volúmicos secos dos provetes de solo-cimento	53
5.3	Resistência à compressão simples.....	55
5.3.1	Introdução.....	55
5.3.2	Provetes de solo.....	55
5.3.3	Provetes com 8% de cimento.....	57
5.3.4	Provetes com 12% de cimento.....	60
5.4	Comparação dos resultados.....	64
5.4.1	Comparação entre as misturas S8C e S12C.....	64
5.4.2	Efeito do teor em cimento	68
5.4.3	Efeito do tempo de cura.....	69
5.5	Resistências máximas obtidas	70
5.6	Comportamento dos provetes.....	71
6	Conclusões e desenvolvimentos futuros.....	73
6.1	Conclusões	73
6.2	Desenvolvimentos futuros.....	74
7	Bibliografia.....	77
Anexo	83	
A.1	Moldagem dos provetes	83
A.1.1	Introdução.....	83
A.1.2	Aparelhos, utensílios e materiais	83
A.1.3	Procedimento	84
A.1.4	Quantidades finais	86
A.2	Registo dos ensaios de resistência à compressão simples	87
A.2.1	Introdução.....	87
A.2.2	Registo de ensaios – provetes de solo.....	88
A.2.3	Registo de ensaios – provetes S8C	89
A.2.4	Registo de ensaios - provetes S12C.....	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema tipo de uma via rodoviária	7
Figura 3.1- Esquema de solo com: a) baixo teor em cimento; b) alto teor em cimento	17
Figura 3.2 - Resistência à compressão simples	27
Figura 3.3 - Solo Aberdeen	29
Figura 3.4 - Solo Everett	30
Figura 3.5 - Solo Palouse	31
Figura 3.6 - Curvas de compactação e pontos de moldagem	32
Figura 3.7 – Variação da resistência à compressão simples em relação ao teor de cimento	33
Figura 4.1– Local de recolha do solo nos Capuchos	36
Figura 4.2 - Extracto da carta geológica de Portugal, na escala 1:50 000, com destaque na zona de recolha	36
Figura 4.3- Curva granulométrica do solo.....	37
Figura 4.4 – Carta de Plasticidade.....	38
Figura 4.5 - Secagem do solo	40
Figura 4.6 - Curva de Compactação do Solo.....	43
Figura 4.7 - Curvas de Compactação	44
Figura 4.8 - Extracção do Provete	46
Figura 4.9 - Provetes	46
Figura 4.10 - Identificação dos provetes	47
Figura 4.11 - Curva de compactação e provetes de solo	48
Figura 4.12 - Curva de compactação e provetes S8C.....	49
Figura 4.13 - Curva de compactação e provetes S12C.....	50
Figura 4.14 - Ensaio de Resistência à Compressão Simples	51
Figura 5.1 - Teores em água e peso volúmico seco dos provetes S8C.....	54
Figura 5.2 - Teores em água e peso volúmico seco dos provetes S12C.....	54
Figura 5.3 - Resistência à compressão simples dos provetes de solo.....	56
Figura 5.4 - Rotura do provete de solo.....	56
Figura 5.5 - Comportamento dos provetes S8C aos 0 dias de cura.....	57
Figura 5.6 - Comportamento dos provetes S8C aos 7 dias de cura.....	57
Figura 5.7 - Comportamento dos provetes S8C aos 28 dias de cura.....	58
Figura 5.8 - Comportamento dos provetes S8C aos 90 dias de cura.....	58

Figura 5.9 - Resistência à compressão simples dos provetes S8C aos 0, 7, 28 e 90 dias de cura	59
Figura 5.10 – Modo de rotura dos provetes S8C aos 0, 7 e 28 dias de cura, respectivamente	60
Figura 5.11 - Comportamento dos provetes S12C aos 0 dias de cura	61
Figura 5.12 - Comportamento dos provetes S12C aos 7 dias de cura	61
Figura 5.13 - Comportamento dos provetes aos 28 dias de cura	62
Figura 5.14 - Comportamento dos provetes aos 90 dias de cura	62
Figura 5.15 - Resistência à compressão simples dos provetes S12C aos 0,7, 28 e 90 dias de cura	63
Figura 5.16 – Modo de rotura dos provetes S12C aos 0, 7 e 28 dias, respectivamente	64
Figura 5.17 - Comparação entre as misturas S8C e S12C aos 0 dias de cura	65
Figura 5.18 - Comparação das misturas S8C e S12C aos 7 dias de cura	66
Figura 5.19 - Comparação das misturas S8C e S12C aos 28 dias de cura	67
Figura 5.20 - Comparação das misturas S8C e S12C aos 90 dias de cura	67
Figura 5.21 - Influência do teor em cimento	68
Figura 5.22 - Influência do tempo cura	69
Figura 5.23 – Resistências máximas obtidas para cada mistura de solo-cimento dos diferentes trabalhos apresentados	71
Figura 5.24 - Comportamento dos três solos aos 7 dias de cura	72

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Comportamento das camadas de uma via rodoviária.....	8
Quadro 2.2 - Factores que afectam a resistência de solos tratados.....	9
Quadro 2.3 - Factores que afectam a resistência de solos tratados - continuação.....	10
Quadro 3.1 - Factores que afectam o comportamento das misturas de solo-cimento	25
Quadro 3.2 - Propriedades geotécnicas do solo.....	27
Quadro 3.3 - Resistência à compressão simples.....	27
Quadro 3.4 - Propriedades geotécnicas dos solos de Washington	28
Quadro 3.5 - Resistência à Compressão Simples - Solo Aberdeen	29
Quadro 3.6 - Resistência à Compressão Simples - Solo Everett.....	30
Quadro 3.7 - Resistência à Compressão Simples - Solo Palouse	31
Quadro 3.8 - Propriedades geotécnicas do solo.....	32
Quadro 4.1 - Propriedades geotécnicas do solo.....	39
Quadro 4.2 - Percentagens de cimento típicas para vários tipos de solo	41
Quadro 4.3 - Nomenclaturas utilizadas na identificação dos provetes.....	42
Quadro 4.4 - Valores das Curvas de Compactação	44
Quadro 4.5 - Características Provetes Solo	48
Quadro 4.6 - Características Provetes S8C.....	49
Quadro 4.7 - Características dos Provetes S12C	50
Quadro 5.1 – Resistências e deformações máximas - provetes Solo.....	56
Quadro 5.2 – Resistências e deformações máximas - provetes S8C	59
Quadro 5.3 – Resistências e deformações máximas - provetes S12C	63
Quadro 5.4 – Média das resistências e deformações máximas de cada conjunto de provetes	65
Quadro 5.5 – Resistências máximas obtidas para cada mistura de solo-cimento dos diferentes trabalhos apresentados	70
Quadro A.1 - Aparelhos e Utensílios	83
Quadro A.2 - Determinação do teor em água do solo	84
Quadro A.3 – Cálculos realizados para obtenção das misturas.....	85
Quadro A.4 - Número total de provetes realizados	86
Quadro A.5 - Quantidade total de solo.....	87
Quadro A.6 - Quantidade total de cimento.....	87
Quadro A.7 - Registo de ensaio provetes Solo.....	88

A.8 - Registo de ensaio de provetes Solo (continuação)	89
Quadro A.9 - Registo de ensaio provetes S8C - 0 dias de cura.....	89
Quadro A.10 - Registo de ensaio provetes S8C - 7 dias de cura.....	90
Quadro A.11 - Registo de ensaio provetes S8C - 28 dias de cura.....	91
Quadro A.12 – Registo de ensaio provetes S8C - 90 dias de cura	92
Quadro A.13 - Boletim de ensaio provetes S12C – 0 dias de cura.....	93
Quadro A.14 - Registo de ensaio provetes S12C - 7 dias de cura.....	94
Quadro A.15 - Registo de ensaio provetes S12C - 28 dias de cura.....	95
Quadro A.16 - Registo de ensaio provetes S12C - 90 dias de cura.....	96

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

Abreviaturas

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials

ACI – American Concrete Institute

ASTM – American Society for Testing Materials

ASTM D – ASTM Designation

DEC – Departamento de Engenharia Civil

FCT – Faculdade de Ciências e Tecnologia

IP – Índice de Plasticidade

IC – Itinerário Complementar

IPQ – Instituto Português da Qualidade

LL – Limite de liquidez

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LNEC E – LNEC Especificação

LP – Limite de Plasticidade

NP – Norma Portuguesa

PCA – Portland Cement Association

SSE – Su-sudeste

UNL – Universidade Nova de Lisboa

Símbolos

d – Diâmetro

γ – Peso volúmico

γ_d – Peso volúmico seco

h – Altura

w – Teor em água

Ws – Peso das partículas sólidas

W_w – Peso da água

1 OBJECTIVOS, METODOLOGIA E ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

1.1 Introdução

O solo é um dos elementos mais importantes no sector da construção, quer no seu estado natural, quer quando utilizado como material de construção (Cruz, M., et al., 2010). O solo natural constitui simultaneamente um material complexo e variável de acordo com a sua localização. Contudo, devido à sua universalidade e baixo custo, apresenta normalmente uma grande utilidade quando aplicado para fins de construção.

O engenheiro civil pretende que as suas estruturas sejam construídas sobre solos estáveis. No entanto, é frequente encontrar solos naturais sem os requisitos necessários para cumprir a função para a qual foram destinados. Quando esta situação ocorre, será necessário tomar uma decisão relativamente à solução mais adequada para cada caso. Esta decisão contemplará umas das seguintes alternativas:

- alterar o projecto adequando-o ao solo existente no local;
- procurar outro local de solo com características mais favoráveis para a execução do projecto pretendido;
- substituir o solo por outro com as características pretendidas;
- alterar as características/propriedades do solo existente de maneira a melhorar o seu comportamento, tornando-o capaz de responder de forma satisfatória às solicitações previstas.

Devido a dificuldades técnicas, económicas, sociais e ambientais as três primeiras alternativas não são de todo muito atractivas e seriam pouco práticas, pelo que assume particular interesse a última alternativa, ou seja, alterar as características do solo existente de modo a melhorar o seu comportamento, que é o que se designa por estabilização ou melhoramento de solos (Cruz, M., 2004).

Não se concebe que nos dias de hoje, um engenheiro civil especializado no projecto e construção de estradas ou aeródromos que não esteja suficientemente familiarizado com as técnicas da estabilização de solos. As razões são várias e não interessa analisá-las profundamente, mas entre elas destacam-se a questão dos custos, os aspectos de rapidez da construção e as preocupações de carácter ambiental cada vez mais pertinentes (Santos, 1976).

Por exemplo, a utilização de bases granulares para pavimentos rodoviários, torna-se inviável quando a pedreira está muito distante do local da obra, devido aos elevados custos associados ao transporte e danos ambientais provenientes da própria exploração e transporte do material. Outro exemplo é a execução de fundações em terrenos de baixa capacidade de suporte, onde a utilização de fundações profundas e os seus custos associados a essa solução podem tornar-se incompatíveis com o porte do empreendimento, como no caso de conjuntos habitacionais (Foppa, 2005).

Com o aumento do preço dos materiais de construção, a redução da disponibilidade de materiais naturais, as novas exigências e as limitações impostas na construção, é imperativo que os engenheiros e investigadores procurem materiais que possam desenvolver bom comportamento com custo relativamente baixo (Specht, 2000).

Existem diferentes processos de estabilização de solos, o mais simples e, na maioria das vezes, também o mais económico, é o da estabilização mecânica, em que se compacta em determinadas condições um solo ou mistura de solos, procurando aumentar a coesão ou o ângulo de atrito interno, ou ambos, conforme o tipo de solo. Existe também a estabilização química, em que as características dos solos são modificadas por adição de aglutinantes, empregam-se para desempenhar a função de ligante, a cal, o cimento, as pozolanas, as cinzas volantes, ou a mistura de algum destes produtos, ou ainda betuminosos (Santos, 1976). Finalmente, na estabilização física procura-se evitar a quebra de resistência ou da durabilidade, por efeito de reacções físicas que modificam as propriedades dos solos, utilizando o calor e a electricidade.

Dos variados processos de estabilização de solos existentes, este trabalho incide sobre a estabilização de solos através da adição de cimento. A crescente utilização das misturas solo-cimento justifica o conhecimento deste método e o aprofundar de informações sobre este tipo de melhoramento das propriedades do solo. O solo-cimento é assim uma mistura altamente compactada de solo/agregados, cimento e água. O produto resultante deste processo tem demonstrado aumento significativo de resistência e rigidez quando comparado com o solo natural, baixa permeabilidade, baixa retracção e boa durabilidade o que o torna um material de construção com potencial para várias aplicações, como por exemplo, fundações superficiais, protecção de taludes, barragens, e, como base e sub-base de pavimentos rodoviários (Specht, 2000).

1.2 Objectivos e metodologia

Os principais objectivos para este trabalho são:

- aprofundar o conhecimento sobre o método de estabilização de solos com adição de cimento;

- avaliar os efeitos da utilização de diferentes dosagens de cimento nas propriedades mecânicas do solo utilizado;
- verificar a influência da variação do tempo de cura na resistência mecânica das misturas de solo-cimento.

Para a realização deste estudo, são apresentadas diferentes aplicações das misturas de solo-cimento, direccionando-se sempre mais para fins rodoviários onde estas têm maior aplicação em Portugal, bases e sub-bases de pavimentos rodoviários, bem como os respectivos mecanismos envolvidos e os tipos de solos mais adequados ao tratamento com cimento. Foi realizado um programa experimental para estudar a influência da quantidade de cimento e do tempo de cura na resistência mecânica de misturas de solo-cimento, utilizando para esse objectivo, a mistura de um solo com duas diferentes dosagens de cimento. Deste modo, foram fabricados uma série de provetes com diferentes quantidades de cimento para posteriormente se realizarem ensaios de resistência à compressão simples para cada tempo de cura estipulado, com o objectivo de analisar e comparar os resultados obtidos.

1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação está estruturada em sete capítulos e um anexo final descritos sucintamente a seguir.

No segundo capítulo pretende-se dar uma visão geral sobre a estabilização de solos e a sua evolução ao longo do tempo, realizando-se uma breve descrição de cada um dos diferentes métodos de estabilização de solos e do grupo a que pertencem.

No terceiro capítulo, é descrita a técnica de estabilização de solos com cimento, referenciando do que se trata e o que são as misturas de solo-cimento e as suas diferentes aplicações. São apontados os mecanismos que podem ocorrer consoante a quantidade de cimento adicionada e os factores que mais influenciam as misturas de solo-cimento, sendo descrito cada um deles. No final deste capítulo, é destacado o tipo dos ensaios realizados neste trabalho - resistência à compressão simples, apresentando-se resultados de trabalhos de outros autores sobre a resistência mecânica de misturas de solo-cimento.

No quarto capítulo, é concretizado o programa experimental deste trabalho. Numa primeira fase é feita a classificação dos materiais utilizados, consoante a classificação do solo foram decididas as quantidades de cimento a usar nas misturas; o passo seguinte foi obter o teor em água óptimo e o peso volúmico seco máximo dessas misturas a partir da realização de ensaios de compactação Proctor. A segunda fase consistiu na moldagem e cura dos provetes a ensaiar tendo como meta os valores

obtidos nos ensaios de compactação Proctor, para posteriormente se realizarem os ensaios de resistência à compressão simples. No final deste capítulo é feita a descrição dos ensaios realizados.

No quinto capítulo, é analisada a diferença entre os valores dos teores em água e peso volúmico seco obtidos para os provetes e os valores estabelecidos como meta. Seguidamente, são apresentados e analisados os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples. Primeiro, faz-se uma análise individual ao solo isolado e a cada mistura, solo com 8% de cimento e ao solo com 12% de cimento para os diferentes tempos de cura. Em seguida comparam-se os valores obtidos das diferentes misturas para iguais tempos de cura.

No sexto capítulo sintetiza-se o trabalho realizado, são apresentadas as principais conclusões consoante os resultados obtidos e sugeridos alguns desenvolvimentos futuros.

A realização deste trabalho foi conseguida através de uma pesquisa bibliográfica, a qual incluiu consulta de diversos trabalhos e estudos de investigação realizados anteriormente sobre o tema abordado ao longo deste trabalho. A bibliografia consultada é apresentada no sétimo capítulo.

Por fim, em anexo, são apresentados os materiais, os procedimentos laboratoriais no processo de moldagem dos provetes e as quantidades finais dos materiais utilizados. Inclui também, os boletins de ensaio de cada provete nos ensaios de resistência à compressão simples.

2 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS

2.1 Considerações gerais

A estabilização ou melhoramento de solos consiste na utilização de qualquer processo de natureza física, química, físico-química ou mecânica (natural ou artificial), com a finalidade de alterar as propriedades dos solos existentes de maneira a melhorar o seu comportamento quanto à utilização como material de Engenharia, tornando-os capazes de responder de forma satisfatória às solicitações previstas.

As alterações das propriedades de um solo podem ser de natureza mecânica, física e química. Contudo, devido à grande variabilidade dos solos nenhum método será bem sucedido em mais do que alguns tipos de solos. De facto, visto que as características de um solo se alteram em intervalos de alguns metros, a escolha de um método de estabilização é normalmente condicionada pelo número e tipo de solos sobre os quais este provou ter uma acção efectiva. Deve também ser notado que a estabilização não é necessariamente um processo infalível através do qual toda e qualquer propriedade do solo é alterada para melhor. Uma aplicação correcta de qualquer método exige assim a identificação clara de quais as propriedades do solo que se pretendem melhorar (Cristelo, 2001).

A resistência dos solos a uma determinada solicitação, além de variar com as características intrínsecas desses solos, varia também com o estado de tensão instalado antes da solicitação e com o teor em água. Sendo assim, torna-se claro que estabilizar um solo em que o estado de tensão é constante e a variação de humidade é reduzida, como por exemplo no interior duma barragem de terra ou sob uma fundação profunda, é bem diferente de estabilizar os terrenos superficiais duma encosta onde a amplitude de variação da humidade é considerável, ou ainda de estabilizar os solos dum pavimento rodoviário onde quer o estado de tensão quer a humidade apresentam significativas variações. Segundo Nascimento (1970), é precisamente na pavimentação de estradas e aeródromos que o solo é mais solicitado, visto que a tensão transmitida pode ir desde valores próximos do zero até várias dezenas de kPa, enquanto o grau de saturação pode variar entre 0 e 100%.

Fundações superficiais de pequenas estruturas também podem ser afectadas por estas variações de humidade no solo, mas é em pavimentos rodoviários que a estabilização dos solos requer maiores cuidados. Para o projectista de vias de comunicação rodoviárias a resistência do solo não é condição suficiente para garantir uma boa estabilização, visto que por exemplo ao compactar um solo expansivo aumenta-se a sua resistência mas em contacto com a água este poderá absorvê-la e expandir, diminuindo novamente a resistência (Cristelo, 2001).

Segundo Winterkorn, 1975, em Cruz, M., 2004, as principais situações que podem justificar o recurso à estabilização de solos são:

- fornecer bases de qualidade para pavimentos quando o recurso aos materiais normalmente utilizados não é viável economicamente;
- permitir a utilização de estradas secundárias e rurais em boas condições;
- permitir a circulação de tráfego militar ou de emergência em determinadas áreas e durante curtos intervalos de tempo;
- actuar como fonte de absorção de ruído, particularmente em zonas urbanas;
- a necessidade de desenvolver áreas economicamente pobres.

A principal aplicação da estabilização de solos sempre foi na execução de pavimentos, nomeadamente das bases, sub-bases e camadas de desgaste de estradas e aeródromos. À medida que os padrões de qualidade na construção são alargados, é cada vez maior a exigência por pavimentos com qualidade e de longa duração. Ora, como em alguns casos os materiais naturais que cumprem estes requisitos apenas podem ser encontrados em locais a partir dos quais o seu transporte não é economicamente viável, surge a hipótese de utilizar os materiais que se encontram no local da obra, o que implica o melhoramento das suas capacidades mecânicas (Cristelo, 2001).

Dentro da estabilização de solos, existem diferentes tipos. Em termos de duração a estabilização de solos pode ser dividida em três grupos, consoante o método de estabilização utilizado e o período de tempo em que o melhoramento alcançado se vai manter (Van Impe, 1989).

1. Estabilização temporária que é limitada a um período, que geralmente, é o tempo de construção da obra.
2. Estabilização permanente sem adição de materiais em que o melhoramento do solo natural é conseguido sem a adição de outros materiais.
3. Estabilização permanente com adição de materiais em que o melhoramento do solo natural é obtido à custa da adição de outros materiais.

Este trabalho pretende aprofundar o conhecimento na estabilização de solos com cimento que pertence ao terceiro grupo – estabilização permanente, em que, depois do cimento e a água serem adicionados e misturados com o solo, dão-se um conjunto de reacções químicas constituindo uma alteração permanente do solo natural. Origina-se assim um novo material com características diferentes e necessariamente mais próximas daquelas que se pretendiam obter. Ainda dentro da estabilização de solos existem diferentes métodos de estabilização. Estes estão agrupados consoante a forma como se vai proceder à estabilização. As misturas de solo-cimento estão inseridas no método de estabilização química que será descrito com maior relevância no ponto 2.3 – Métodos de estabilização de solos.

2.2 Evolução histórica

Os solos são o mais antigo e complexo material de engenharia e a necessidade de proceder à sua estabilização já remonta a tempos distantes. O melhoramento de solos começou a ser utilizado para a construção de pavimentos rodoviários nas civilizações Mesopotâmica e Romana, mas já outros povos tinham recorrido esporadicamente ao emprego de cal para estabilização de solos (Hamzah, 1983 em Cruz, M., 2004).

O tratamento de solos foi introduzido há mais de 3000 anos para a construção dos templos da antiga Babilónia, constituindo uma das primeiras manifestações da engenharia. Apresenta-se hoje em dia como uma das áreas de maior importância no ramo geotécnico, devido aos terrenos apresentarem cada vez menos qualidade e os seus preços aumentarem exponencialmente dia após dia em particular nos grandes aglomerados urbanos, para além das exigências funcionais serem cada vez maiores e mais complexas e também pela crescente preocupação com o ambiente (Ferreira, C. et al, 2010).

Os Gregos e Romanos encarregaram-se de desenvolver a técnica de aplicação da cal para a estabilização de solos, uma vez que havia necessidade de obter superfícies rígidas para a circulação dos veículos com rodas, chegando a ser utilizado um outro material, a pozolana (cinza vulcânica), para melhorar a acção de cimentação da cal. Mas, com o passar dos tempos tornou-se evidente a incapacidade destes pavimentos suportarem as velocidades e as cargas dos veículos postos em circulação a partir do início do século passado (Castro, 1970 em Cruz, M., 2004).

A investigação então efectuada levou a que as vias rodoviárias começassem a ser executadas em betão ou com betuminosos (camada de desgaste), assentes em camadas de fundação, ou seja, bases e sub-bases devidamente estabilizadas, esquema que ainda hoje se mantém. Na Figura 2.1 é apresentado o esquema tipo de uma via rodoviária.

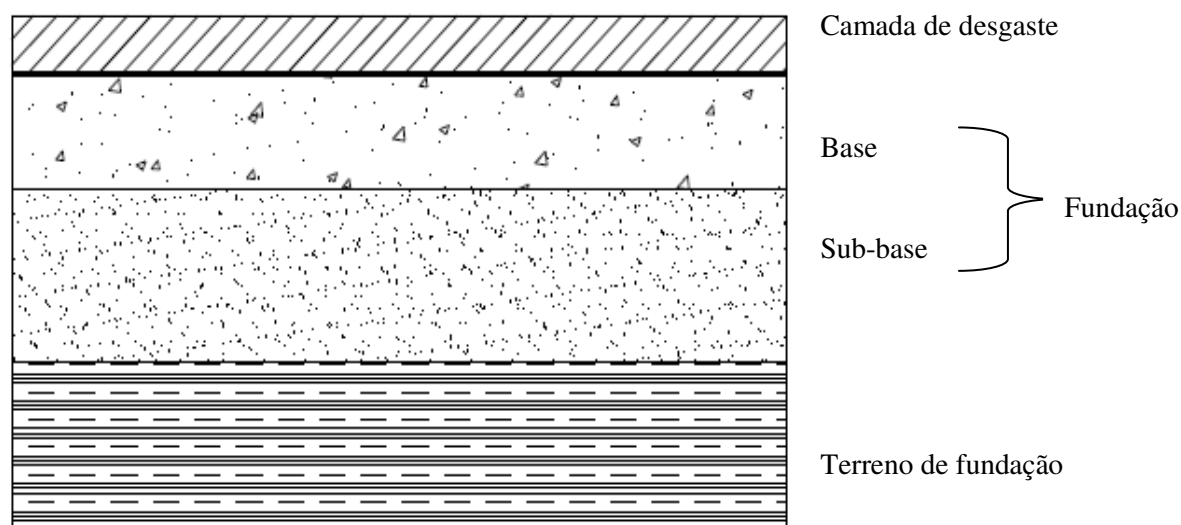


Figura 2.1 - Esquema tipo de uma via rodoviária (Cruz, M., 2004)

A camada de desgaste tem como função suportar directamente o tráfego e transmitir as respectivas solicitações às camadas de fundação. As camadas de base e sub-base devem permitir melhorar as condições de execução do pavimento, principalmente, em termos de uniformidade, suportar as solicitações transmitidas pela superfície, controlar a expansibilidade dos solos de fundação e contribuir, quer para a drenagem das águas à superfície, quer para a drenagem interna do pavimento (Cruz, M., 2004). No Quadro 2.1 encontram-se resumidos os aspectos referidos acima.

Quadro 2.1 - Comportamento das camadas de uma via rodoviária

Camada de desgaste	Circulação em condições de segurança, conforto e economia	Comportamento Funcional
Camada de base e sub-base	Capacidade de carga	Comportamento Estrutural

A maior parte dos métodos actuais de melhoramento de solos foram iniciados nos Estados Unidos no início do século XX. Foi também nesta época que se começaram a desenvolver os equipamentos associados aos diversos métodos de melhoramento. Na Europa, o despertar para a necessidade de estabilizar os solos chegou na década de 30, altura de florescimento da indústria automóvel nesta parte do globo. No entanto, o grande impulso verificou-se no período pós 2ª Guerra Mundial, na tentativa de dar resposta à grande necessidade de construção de estradas e pistas de aeródromos, altura onde foi muito utilizada a estabilização com cimento (Hamzah, 1983 em Cruz, M., 2004).

Na década de 40, nos Estados Unidos, foram desenvolvidas e aplicadas as técnicas de ensaios laboratoriais para solos estabilizados, permitindo fazer uma avaliação quantitativa das características destes solos (Cruz, M., 2004).

Segundo Branco, 1988, em Portugal o desenvolvimento da construção rodoviária, principal aplicação dos diversos métodos de estabilização, seguiu a tendência verificada nos outros países europeus. Assim, a construção de pavimentos rodoviários, no início, baseava-se nos pavimentos flexíveis, constituídos por uma camada de desgaste em mistura betuminosa, cuja camada de base é não tratada ou tratada por um ligante betuminoso. Uma vez que em Portugal se dispunha de materiais granulares de boa qualidade e em quantidade suficiente e o betume podia ser adquirido a preços vantajosos, os pavimentos eram constituídos por camadas granulares não tratadas, que poderiam ser ou não protegidas com um revestimento superficial ou cobertas com camadas de argamassa ou betão betuminoso, consoante a importância da estrada.

No entanto, o aumento progressivo dos volumes de tráfego e das cargas por eixo dos veículos que se verificou na maioria dos países, conduziu à ruína antecipada de muitos pavimentos, pelo que houve necessidade de utilizar soluções mais resistentes à custa de bases tratadas com aglutinantes hidráulicos ou betuminosos e de camadas de desgaste mais espessas e de melhor qualidade. Esta evolução na construção rodoviária e o aumento do custo dos betumes conduziu ao uso dos pavimentos rígidos e semi-rígidos (Branco, 1988).

O pavimento rígido é constituído por uma camada de desgaste que é realizada com betão de cimento de elevada resistência. O pavimento semi-rígido é constituído por uma camada superior em mistura betuminosa aplicada sobre camadas de materiais tratados com ligantes hidráulicos (Neves, J., 2010).

Numa altura em que a sustentabilidade da construção é tão falada, o tratamento de solos torna-se um ponto fulcral para tal estabilidade, tanto a nível ambiental, como social e económico. De facto, o aproveitamento do solo existente no local da obra a construir, independentemente da sua qualidade ou adequabilidade, permite não só evitar a substituição dos materiais existentes por outros de melhor qualidade recolhido em zonas de empréstimo, como também permite evitar a necessidade de local de depósito dos materiais de fraca qualidade e consequente poluição desses locais (Cristelo e Jalali, 2007).

Com o desenvolvimento tecnológico registado nestas últimas décadas surgiram naturalmente novas tecnologias de tratamento de solos, tecnologias cada vez mais eficientes que utilizam equipamentos de grandes desempenhos e rapidez de execução (Ferreira, C., et al., 2010).

A eficiência do tratamento de um solo por estas novas tecnologias ou outra qualquer tecnologia está dependente, para além dos factores inerentes ao processo tecnológico utilizado, dos factores indicados no Quadro 2.2 onde estão igualmente indicados os parâmetros correspondentes a cada um desses factores que afectam a resistência dos solos tratados.

Quadro 2.2 - Factores que afectam a resistência de solos tratados (Terashi, 1997)

Factores	Parâmetros
Características do agente estabilizador	Tipo de agente estabilizador Qualidade Mistura água e aditivos

Quadro 2.3 - Factores que afectam a resistência de solos tratados - continuação (Terashi, 1997)

Factores	Parâmetros
Características e condições do solo	Propriedades químicas e mineralógicas do solo Teor de matéria orgânica PH da água contida no solo Teor em água
Condições de mistura	Grau de mistura Tempo de mistura/remistura Qualidade do agente estabilizador
Condições de cura	Temperatura Tempo de cura Humidade Molhagem/secagem, gelo/degelo, etc

Para o estudo da influência de cada um desses factores recorre-se aos estudos de formulação laboratorial. Além disso, estes estudos permitem a determinação do melhor ou melhores ligantes a utilizar na mistura com o solo, assim como as quantidades a utilizar de forma a alcançar os objectivos pretendidos e especificados no projecto. Estes ensaios são de extrema importância devido à elevada complexidade de reacções físico-químicas entre as partículas de solo e ligante, as quais são de difícil previsão, sendo portanto apenas possível averiguar a compatibilidade solo-ligante através da realização de provetes efectuados com os diversos ligantes, em diferentes condições de estado (teor em água e compacidade) e, em diversas proporções (Ferreira, C., et al., 2010).

Uma das técnicas construtivas mais utilizadas a nível mundial em obras rodoviárias e ferroviárias é a aplicação de ligantes hidráulicos, designadamente, o cimento, como produto de tratamento das propriedades dos solos.

Este tipo de técnicas está também em crescimento em Portugal, particularmente em obras rodoviárias, estando referenciada ao longo dos anos por diversos autores (Neves, J., 1993; Gomes Correia e Neves, 1996; Cristelo, 2001; Santos, 2008; Pinto, 2009; Neves, J., 2009) resultante de vantagens económicas associadas a uma crescente preocupação ambiental. O desenvolvimento deste tipo de técnicas está relacionado com a evolução verificada nos últimos anos, permitindo actualmente uma boa qualidade final e rendimentos bastante interessantes na execução das camadas tratadas. Estes tipos de tratamentos concedem uma melhoria significativa no comportamento dos solos sob o efeito de

acções mecânicas, dinâmicas e estáticas, garantindo a estabilidade e durabilidade da mistura (Fernandes, J., et al 2010).

As principais propriedades dos solos que são objecto da preocupação de um engenheiro e que poderão ser objecto de melhoramento são:

- resistência;
- controle das deformações;
- permeabilidade;
- durabilidade.

2.3 Métodos de estabilização

2.3.1 Generalidades

Os métodos existentes para a estabilização de solos não são adequados para todos os tipos de solos, podendo ser divididos em três grupos, de acordo com os meios que são utilizados (Cruz, M., 2004).

- Estabilização mecânica em que se procura melhorar as características dos solos através de uma melhor arrumação das suas partículas sólidas e/ou recorrendo a correcções da sua composição granulométrica.
- Estabilização física em que as propriedades dos solos são alteradas através do uso do calor e da electricidade.
- Estabilização química em que as características dos solos são modificadas através de aditivos.

Nos pontos seguintes são descritos, de uma forma simples, os fundamentos de cada um destes métodos.

2.3.2 Estabilização mecânica

Dos diferentes métodos de estabilização de solos, o mais simples e, na maioria das vezes, também o mais económico, é o da estabilização mecânica, em que se compacta em determinadas condições um solo ou mistura de solos, procurando aumentar a sua resistência ao corte, conforme o tipo de solos (Santos, 1976). A estabilização mecânica engloba diversos processos, mas todos têm o mesmo objectivo que é a diminuição da quantidade de vazios existentes nos solos melhorando as suas

características, não só quanto à resistência, mas também, em relação à permeabilidade, compressibilidade, absorção de água e, principalmente, estabilidade.

A necessidade de trabalhar com solos correctamente estabilizados verifica-se com maior frequência em obras de pavimentação rodoviária. Assim, e no que respeita ao projecto rodoviário, a estabilização mecânica de um solo consiste num conjunto de operações “mecânicas” que lhe conferem maior estabilidade. São consideradas como operações mecânicas aquelas que apenas modificam o arranjo das partículas do solo, ou a sua granulometria, por meio da subtracção ou adição de algumas fracções (Nascimento, 1970).

2.3.3 Estabilização física

Este método de estabilização de solos modifica as propriedades dos solos, utilizando o calor e a electricidade e tem no custo o seu ponto mais fraco. Apesar disso, continua a ser estudado e desenvolvido, tendo sido alvo de vários testes ao longo dos últimos anos, com resultados variáveis, tendo a sua eficácia sido melhorada ao longo das últimas décadas, à medida que os resultados vão sendo mais conhecidos.

Este método pode ser dividido na estabilização por electro-osmose e térmica, estando incluídos nesta última os métodos de aquecimento e congelação, que são utilizados quando alguma dificuldade impede o recurso a métodos menos dispendiosos (Cruz, M., 2004). Por exemplo, se um aterro for construído sobre um estrato mole altamente compressível, a sua consolidação irá sempre afectar as camadas sobrejacentes. A taxa de consolidação, particularmente lenta em solos de reduzida permeabilidade, pode ser acelerada através de várias técnicas, tais como o recurso a drenos verticais, a sobrecargas temporárias e à electro-osmose (Cristelo, 2001).

A estabilização por electro-osmose consiste em colocar dois eléctrodos numa massa de solo e fazer passar uma corrente eléctrica entre eles, fazendo com que haja uma migração da água presente no solo no sentido do eléctrodo positivo para o negativo, de onde é feita a remoção da água. Diminui-se assim a quantidade de água no solo, o que permite a sua consolidação (Hamzah, 1983 em Cristelo, 2001).

A estabilização térmica por aquecimento pode ser conseguida por meios eléctricos ou através da queima de um combustível, colocado num tubo perfurado que aquece uma zona do solo e permite a evaporação da água. Esta evaporação de água engloba a água absorvida e a água livre presente no solo, o que provoca uma aproximação entre as partículas, aumentando consequentemente a resistência do solo. Também se verifica uma diminuição da compressibilidade devido à menor quantidade de água presente no solo. Mas, para que estas propriedades alteradas se mantenham, será necessário isolar o maciço tratado de forma a evitar a sua posterior molhagem (Hamzah, 1983 em Cruz, M., 2004).

Falta só referir o método da congelação, que utiliza um sistema que permite congelar a água existente nos vazios ou poros do solo, dando origem a um material rígido de maior resistência. São

instalados, no solo saturado, tubos com dado raio e afastados de certa distância, consoante as condições de percolação “in situ”, o tipo de solo e a variação das propriedades térmicas durante a redução da temperatura (condutibilidade e calor específico). Pelos tubos circula o fluído que provoca a congelação da água presente no solo e possivelmente de outros líquidos (Hamzah, 1983 em Cruz, M., 2004).

2.3.4 Estabilização química

Neste tipo de estabilização podem ser utilizados vários tipos de aditivos químicos. As partículas do solo são aglutinadas através de reacções químicas. A estabilização química utilizada em obras de pavimentação rodoviária recorre normalmente a ligantes hidráulicos, nomeadamente, ao cimento, à cal, aos materiais betuminosos, às resinas e aos carbonatos (Hamzah, 1983). Contudo, será interessante notar que o grupo de estudo da caracterização dos solos de fundação de pavimentos rodoviários, reunido no “Workshop on Improved Pavement Design” realizado em Março de 1996, e que tinha como principal objectivo preparar o Guia 2002 da AASHTO (American Association of State Highway & Transportation Officials), apenas teve em conta a estabilização com cimento, betume, cal e cal/cinzas (Little, 1999 em Cristelo, 2001).

As principais vantagens conseguidas através da estabilização de solos com aditivos químicos, nomeadamente ligantes hidráulicos estão relacionadas com a redução do índice de plasticidade, bem como com o aumento da trabalhabilidade resultante de evoluções granulométricas, tornando o material mais granular, garantindo o aumento da rigidez a médio/longo prazo (Fernandes, J., et al 2010).

Cada vez mais utilizado em Portugal, sobretudo em obras rodoviárias, o tratamento de solos com ligantes hidráulicos justifica-se pelas necessidades de carácter económico e também por uma crescente preocupação ecológica. O desenvolvimento desta técnica construtiva está associado ao progresso tecnológico verificado nos últimos anos, permitindo actualmente consideráveis rendimentos e uma boa qualidade de construção (Cristelo, 2001). Dos diversos produtos químicos utilizados para a estabilização, o cimento é o de utilização mais generalizada, devido à sua disponibilidade e maior adequabilidade a solos não coesivos (Cruz, M., et al 2010).

Este método possibilita o emprego de solos locais na construção de pavimentos rodoviários, que devido à sua baixa qualidade não poderiam ser utilizados isoladamente dado que não se adequariam ao exigido pelas especificações para a construção de bases e sub-bases. Além deste facto, o uso de solos estabilizados em vez dos agregados naturais, cada vez mais escassos, pode ter consideráveis vantagens ambientais e económicas (Sherwood, 1995).

Visto que as soluções de baixo custo são as mais desejáveis tanto para o sector privado como para o público, esta possibilidade de estabilização para a construção de vias de comunicação torna-se cada vez mais promissora.

Sob o ponto de vista ambiental, económico e de segurança podem referir-se os seguintes benefícios (Cruz, M., 2004):

- minimização da perda de material ocasionada pela erosão ou pelo tráfego, nas estradas de terra;
- redução dos custos de compra, transporte e distribuição de agregados;
- redução dos materiais superficiais soltos ocasionadores de acidentes (problemas de visibilidade e derrapagens);
- minimização da agressão ambiental causada pela instalação de pedreiras e britagem;
- redução do uso de combustível associado às frequentes manutenções rodoviárias;
- resguardo das jazidas de bons materiais para usos mais nobres.

Dentro dos diferentes métodos de estabilização de solos importa saber o que avaliar para escolher o que melhor se adapta ao caso em estudo, tendo em conta que o método escolhido não é necessariamente um processo infalível do qual todas as propriedades dos solos são alteradas para melhor. Por isso é que uma aplicação correcta de qualquer método exige a identificação clara de quais as propriedades do solo que se pretendem melhorar. Para que a escolha seja a mais adequada possível devem ser analisados os seguintes aspectos (Cruz, M., 2004):

- objectivo do melhoramento (propriedades a alterar, duração do melhoramento, etc);
- área e espessura do solo a tratar;
- tipo de solo e suas características;
- materiais disponíveis para proceder à estabilização;
- equipamento e empresas especializadas disponíveis;
- factores ambientais (erosão, poluição);
- experiência e preferências locais;
- tempo disponível;
- custos.

Dos três grupos de métodos de estabilização de solos mencionados, é na estabilização química que está inserida a estabilização de solos através da adição de cimento, principal objectivo deste trabalho, pelo que lhe será dado um maior desenvolvimento no capítulo seguinte.

3 ESTABILIZAÇÃO DE SOLOS COM CIMENTO

3.1 Introdução

O solo-cimento é definido pelo ACI (American Concrete Institute) como uma mistura de solo e quantidades determinadas de cimento e água, compactado para um peso volúmico seco máximo. Solo-cimento pode também ser definido, como um material produzido pela mistura, compactação e cura dos materiais solo/agregados, cimento e água. Além destes três materiais poderá também conter adições, tais como, cinzas volantes, pozolanas, cal, de modo a formar um material endurecido com características capazes de responder a propriedades impostas sob o ponto de vista da engenharia.

As misturas de solo-cimento diferem do betão em muitos aspectos. Uma diferença relevante é a maneira pela qual os agregados ou partículas do solo são mantidas juntas. Nas misturas de solo-cimento a quantidade de pasta (cimento mais água) é insuficiente para recobrir a superfície de todas as partículas de solo e preencher todos os vazios existentes, resultando em núcleos de cimento distribuídos pela massa de solo, enquanto no caso do betão existe uma quantidade de pasta, suficiente para recobrir a superfície dos agregados e preencher os vazios existentes entre os mesmos (PCA, 2011).

A adição de cimento ao solo tem sido denominada de diferentes maneiras conforme o autor. Termos como solo estabilizado, solo melhorado, solo modificado e solo tratado com cimento são regularmente utilizados. Em geral, o critério para a adopção de uma ou outra denominação é o grau de alteração das propriedades do solo natural em função da quantidade de adição aplicada. Contudo, os processos são conceptualmente os mesmos, ou seja, introdução e mistura de cimento ao solo para obtenção de propriedades como resistência ou deformabilidade adequadas a um determinado uso de engenharia (Foppa, 2005).

Como já aconteceu anteriormente, os termos solo tratado, solo melhorado ou solo estabilizado já foram utilizados. Durante este trabalho não será feita distinção entre os diferentes termos, sendo mantido o termo utilizado pelo autor citado.

De acordo com Manuel Santos, no Curso de solo-cimento (1976), os principais usos de misturas solo-cimento podem enumerar-se como segue: construção de camadas de base para estradas, ruas e pistas de aviação, construção de camadas de base em pavimentos rígidos ou flexíveis, pavimentação de bermas em estradas e aeródromos, pavimentação de áreas de estacionamento, pavimentação de áreas de armazenamento para agregados, materiais diversos ou equipamento, pavimentação de passeio ou pistas de ciclistas. E também na construção de sub-bases de vias rodoviárias e ferroviárias, especialmente nas zonas de transição entre aterros e estruturas rígidas, onde as propriedades mecânicas dos solos de apoio são muito influentes.

Perante estas aplicações dos métodos de melhoramento de solos pode verificar-se que a estabilização com mistura de solo-cimento é bastante utilizada no sector da construção de vias rodoviárias, sendo geralmente utilizada como base e sub-base de pavimentos. Estas soluções são especialmente atraentes em obras onde outras técnicas de melhoramento, como por exemplo a estabilização por electro-osmose e térmica, poderiam ser aplicadas mas seriam mais extensivas e portanto mais caras. Por outro lado, a melhoria dos solos disponíveis no local pode trazer grandes vantagens, evitando uma grande quantidade de empréstimo de material adequado, bem como a necessidade de dispor grandes volumes depositados (Consoli et al, 2009).

Segundo Ingles e Metcalf, 1972 sempre que não se dispõe de um material ou combinação de materiais com as características de resistência, deformabilidade, permeabilidade ou durabilidade adequadas ao projecto poderá utilizar-se o solo-cimento, dentre as diversas técnicas de estabilização.

Nos Estados Unidos, sensivelmente desde 1915 são usadas camadas de solo tratadas com cimento para a construção de bases e sub-bases de pavimentos rodoviários. O uso destas camadas deve-se ao facto de se reconhecer que o cimento contribui para uma melhoria de várias propriedades no comportamento do solo, e o facto de poder ser aplicado a uma grande variedade de solos, desde materiais granulosos, solos siltosos e argilas (Zhang, Z., et al, 2008).

Outro aspecto extremamente importante é que o uso da técnica do solo-cimento reduz significativamente a quantidade de recursos naturais utilizados no processo de construção. Com aproximadamente 90% de solo-cimento sendo material que pode ser obtido no local da obra (solo), somente cerca de 10% (cimento) requer o transporte para o local. O consumo reduzido de recursos naturais também reduz a quantidade de tráfego, poluição e danos globais para o meio ambiente (Foppa, 2005).

Mas apesar da utilização comum do cimento para a estabilização de solos, não existem ainda metodologias de dosagem baseadas em critérios racionais como no caso dos betões, onde a proporção água/cimento desempenha um papel fundamental na determinação da resistência final pretendida.

Em trabalhos recentes a percentagem solo-cimento foi avaliada por diversos testes laboratoriais com o objectivo de descobrir a quantidade mínima de cimento que garanta as propriedades pretendidas em termos de resistência e durabilidade. Esta tentativa provavelmente resulta do facto da mistura solo-cimento apresentar um comportamento complexo que é afectado por muitos factores, como por exemplo a quantidade de cimento, a porosidade e o teor em água que o solo contém no momento da compactação (Consoli N., et al, 2009).

Ao longo deste capítulo são apresentados os mecanismos que podem ocorrer consoante é adicionada uma maior ou menor quantidade de cimento ao solo e as possíveis utilizações resultantes dessa quantidade de cimento adicionada. São referidos os factores que mais influenciam no comportamento das misturas de solo-cimento, sendo feita uma breve descrição de cada um deles. No final, é dado maior destaque na secção 3.5 - resistência à compressão simples, pois foi este o ensaio que se realizou neste trabalho, visto ser o mais importante na determinação da resistência mecânica de

misturas de solo-cimento. Para tal, foi feita uma pesquisa em trabalhos onde se realizaram ensaios de resistência à compressão simples a provetes de solo com diferentes percentagens de cimento, de forma a mostrar os gráficos e resultados obtidos desses estudos.

3.2 Mecanismos de estabilização de solos com cimento

Nas misturas de solo-cimento, consoante o teor de cimento adicionado ao solo, a acção estabilizante do cimento pode ocorrer segundo dois mecanismos distintos. Um dos mecanismos verifica-se para teores em cimento menores, fundamentalmente uma modificação da fracção argilosa do solo que diminui a sua plasticidade, podendo ser ou não acompanhada de aumento da resistência mecânica, uma vez que o cimento, nestes casos, forma núcleos independentes na massa de solo (ver Figura 3.1a). O outro mecanismo permite o aumento da resistência mecânica devido à acção aglutinante do aditivo que cimenta as partículas de solo. Este efeito verifica-se quando são misturados teores em cimento mais elevados, em que o cimento forma núcleos interligados distribuídos pela massa de solo (ver Figura 3.1b).

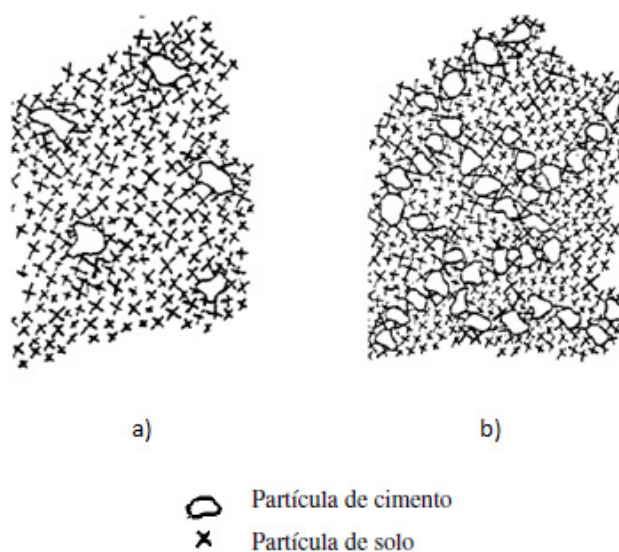


Figura 3.1- Esquema de solo com: a) baixo teor em cimento; b) alto teor em cimento (Cruz, M., 2004)

Mediante estes dois tipos de acções, podem distinguir-se três tipos de mistura de solo com cimento, que têm geralmente utilizações distintas (Pereira, 1970). São elas:

- solo-cimento ou solo-cimento compactado – mistura de solo com cimento, em que a quantidade deste é suficiente, a partir de 4% em relação à massa de solo seco, para conduzir ao

seu endurecimento e que deve ser preparada com o teor em água necessário a uma compactação adequada e à hidratação do cimento. São misturas utilizadas na construção de camadas de base e de sub-base de pavimentos de estradas e aeródromos, de pavimentos de pistas ou estradas de pequeno tráfego, de faixas para aterragens de emergência e de núcleos de barragens de terra;

- solo corrigido com cimento ou solo modificado com cimento – mistura de solo com uma pequena proporção de cimento, até 4% de cimento em relação à massa de solo seco que visa corrigir propriedades como a plasticidade, a expansibilidade e a capacidade de carga. A quantidade de cimento geralmente é superior a 1%, mas menor que o teor das misturas de solo-cimento anteriores, o que não permite o endurecimento significativo da mistura. São utilizadas essencialmente nas camadas que constituem o “leito dos pavimentos” e por vezes nos pavimentos de estradas de tráfego muito reduzido;
- solo-cimento plástico – mistura de solo com cimento em quantidade suficiente para provocar o seu endurecimento, a partir de 4% de cimento em relação à massa de solo seco e com uma quantidade de água suficiente para conferir à mistura, no momento da aplicação, uma consistência semelhante à das argamassas, isto é, uma quantidade de água superior à que corresponde o teor em água ótimo. São misturas utilizadas no revestimento de valas, canais, taludes, pequenos troços de pavimentos e reparações de pavimentos, trabalhos em que não é possível utilizar os equipamentos rodoviários de pulverização, mistura e compactação ou quando existem dificuldades de colocação em obra.

O tipo de mistura designado por solo-cimento ou solo-cimento compactado é a mistura que se pretendeu estudar neste trabalho. São estas as misturas que se utilizam na construção de bases e sub-bases de pavimentos rodoviários. O teor de cimento adicionado é superior ao dos outros tipos de misturas pois pretende-se que haja um aumento da resistência mecânica originada pela acção do cimento permitindo que desempenhem um comportamento estrutural.

3.3 Propriedades das misturas de solo-cimento

3.3.1 Generalidades

As propriedades dos solos estabilizados com cimento dependem de vários factores que têm grande influência no comportamento e características finais que se pretendem para as misturas. Da

pesquisa e literatura consultada (ACI 230, 1990; Cruz 2004; Foppa 2005), os factores que mais influenciam as propriedades das misturas de solo-cimento, são os seguintes:

- tipo de solo;
- proporção e condições da mistura;
- compactação;
- tempo de cura;
- presença de aditivos.

Cada um dos factores apresentados acima afecta de maneira diferente o comportamento das misturas de solo-cimento. Neste sub-capítulo são apresentados cada um dos factores individualmente e explicada a forma como interferem ou contribuem no comportamento destas misturas.

3.3.2 Tipo de solo

O solo é sem dúvida o constituinte que compõe as misturas de solo-cimento que mais afecta as suas características. Uma das razões é o facto de este ser sempre o material em maior quantidade na mistura. A sua influência processa-se através de várias formas, tais como a granulometria, a plasticidade, a composição química das partes orgânica e mineralógica, a actividade química da superfície das partículas finas, etc (Pereira, 1970). Um solo será adequado para a estabilização com cimento, tendo em conta as propriedades físicas, quando tiver uma granulometria e plasticidade que permita que ele possa ser facilmente dividido e pulverizado com baixos teores de cimento e que a mistura possa ser convenientemente trabalhada com os meios mecânicos disponíveis. No aspecto químico a adequabilidade de um solo está dependente da presença de substâncias prejudiciais cuja acção possa prejudicar o endurecimento da mistura ou provocar uma diminuição da durabilidade, devido à destruição das ligações motivadas pelo cimento (Nascimento, 1970).

Visto que as características do solo podem conduzir ao sucesso ou insucesso do processo de estabilização com cimento ou pelo menos influenciam os aspectos económicos, revela-se muito importante a escolha deste processo de estabilização somente quando os solos forem adequados.

A estabilização recorrendo ao uso de cimento pode ser usada para quase todos os tipos de solo. Algumas excepções incluem os solos orgânicos (solos com mais de 2% em matéria orgânica são considerados inaceitáveis para a estabilização com cimento) e argilas altamente plásticas. Solos granulares são os que melhor se adequam à estabilização com cimento. Nas misturas de solos granulares com cimento a quantidade deste não é suficiente para preencher a totalidade dos vazios existentes. Assim, no caso destes solos, o cimento ligará as áreas de contacto das partículas de solo. Como estas áreas dependem da granulometria do solo, maximizando-se o número de pontos de

contacto, o que aumenta com a boa graduação dos solos, menor será o teor necessário para se atingir certa resistência, conseguindo-se uma mistura de solo-cimento mais económica (ACI 230 e Pereira, 1970).

No entanto, alguns solos com maior teor de finos e baixa plasticidade são estabilizados com sucesso. Mas estes solos de uma maneira geral exigem uma maior percentagem de cimento para adquirirem determinada resistência.

Segundo a especificação do LNEC E243 - 1971 (Solos. Solo-cimento) a adequabilidade ou não de um solo depende de duas propriedades físicas, granulometria e limites de consistência, e de propriedades químicas, tais como, a presença de matéria orgânica e a presença de sulfatos, além das condições gerais que estes solos devem possuir.

Para sistematizar as condições a que devem obedecer os solos com vista à sua estabilização com cimento, o LNEC na especificação E243-1971, estabelece os seguintes pressupostos:

- Condições gerais: solos isentos de raízes, capim ou qualquer substância prejudicial ao cimento Portland;
- Condições químicas: teores máximos, em matéria orgânica, 2%, em sulfatos, 0.2%;
- Granulometria: percentagens passadas nos peneiros ASTM de 50.0 mm e nº 4 (4.75 mm) iguais ou superiores respectivamente a 80 e 45%;
- Limites de consistência: o limite de liquidez tem que ser igual ou inferior a 45%.

Os processos envolvidos na estabilização de solos com cimento são fortemente prejudicados pela presença de matéria orgânica no solo, que inibe ou retarda a acção aglutinante do cimento e dificulta a libertação de iões de cálcio, prejudicando assim o ganho de resistência por parte do solo. A matéria orgânica deriva da decomposição da vegetação que está invariavelmente presente na superfície dos solos e que se pode estender até uma profundidade de 1.5 metros, no caso de solos bem drenados (Sherwood, 1995).

O excesso de sais especialmente os sulfatos é prejudicial nas misturas de solo-cimento, pois além de prejudicar a adequada hidratação do cimento, atacam-no causando expansões, fissuração, amolecimento e desintegração afectando assim o comportamento destas misturas.

A análise granulométrica do solo permite determinar quantitativamente a distribuição por tamanhos das partículas constituintes de um solo. A representação habitual da granulometria de um solo faz-se através da curva granulométrica. As curvas granulométricas são, assim, representadas em gráficos semi-logarítmicos em que, em abcissas se representa em escala logarítmica os diâmetros das partículas e, em ordenadas, as percentagens acumuladas do material com dimensão inferior aos valores indicados em abcissa.

A obtenção dos valores dos limites de consistência, ou de Atterberg, depende de solo para solo e o seu conhecimento constitui um importante elemento para a compreensão do comportamento dos solos.

O limite de plasticidade (LP) corresponde ao teor em água que indica a passagem do estado semi-sólido para o estado plástico e o limite de liquidez (LL) representa o teor em água que indica a passagem do estado plástico para o estado líquido. O índice de plasticidade (IP) é a diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade e representa a dimensão da gama de valores em água na qual o solo apresenta um comportamento moldável. Conforme se verá, o índice de plasticidade e o limite de liquidez contribuem para a classificação de solos.

3.3.3 Proporção e condições da mistura

Para além do solo, os dois constituintes principais das misturas de solo-cimento são o cimento e a água que se adicionam a este em quantidades determinadas, de forma a obter-se uma mistura com as características pretendidas.

De acordo com o ACI 230 (1990), as percentagens de cimento variam consoante as propriedades do solo, podendo variar desde um valor mínimo de 4 até um valor máximo de 16% em relação à massa de solo seco. De uma forma geral, quanto maior a porção de argila maior a quantidade a adicionar de cimento. Segundo Pereira, 1970 em Cruz, M., 2004 as percentagens normalmente utilizadas nas misturas de solo-cimento estão compreendidas entre 5 e os 15% em relação à massa de solo seco (não variam muito das percentagens referidas pelo ACI), sendo estas as misturas usuais, não só em camadas de sub-base de estradas, mas também por vezes em camadas de base. O aumento do teor de cimento conduz a resistências mais elevadas para um mesmo solo. No entanto, a utilização de um teor em cimento superior ao necessário tem inconvenientes, quer do ponto de vista económico, quer técnico.

Um teor em cimento elevado, embora permita obter uma elevada resistência da mistura, conduz a retrações exageradas que fracturam a mistura em blocos de dimensões médias, com malhas de fendas demasiado largas. As misturas de solo-cimento em pavimentos comportam-se como um material semi-rígido, em virtude das muitas fissuras que dividem as misturas em blocos imbricados uns nos outros. Estas fissuras devem ser suficientemente discretas para garantir o grau de rigidez necessário (Cruz, M., 2004).

A adição de pequenas quantidades de cimento (até 2%) modificará as propriedades do solo, enquanto maiores quantidades irão alterar radicalmente as suas propriedades (Ingles e Metcalf, 1972). De acordo com os mesmos autores, as propriedades do solo mudam com o aumento da quantidade de cimento: a capacidade de carga aumenta, a durabilidade a ciclos de molhagem e secagem aumenta em

geral, a permeabilidade diminui, porém, aumenta em solos argilosos, a tendência à retracção aumenta em solos granulares e a tendência à expansão de solos argilosos será reduzida.

Cruz M., (2004) refere que o recurso ao uso de cimento para a estabilização de solos é um método viável que permite obter consideráveis melhorias nas características do solo, quer do ponto de vista mecânico, quer da durabilidade.

Muhunthan e Sariosseiri, (2008) observaram que à medida que se adiciona uma maior percentagem de cimento ao solo, a resistência à compressão simples sofre um aumento enquanto o valor da deformação axial sofre uma diminuição, havendo assim uma mudança de comportamento que passa de dúctil no solo isolado a frágil para as misturas de solo-cimento.

Relativamente à quantidade de água nas misturas de solo-cimento esta corresponde ao teor em água óptimo para a compactação, obtido através do ensaio Proctor na mistura de solo e cimento. O teor em água necessário para a hidratação do cimento é inferior ao óptimo para a compactação, pelo que a água necessária para a hidratação está assegurada se forem satisfeitas as necessidades de compactação e se não houver perdas durante o período de cura (Cruz, M., 2004).

3.3.4 Compactação

A compactação é o processo pelo qual uma massa constituída de partículas sólidas, ar e água, é reduzida em volume pela aplicação de carga. Envolve expulsão de ar do sistema sem significativa mudança na quantidade de água da massa de solo. Consequentemente, o teor em água do solo é normalmente o mesmo para um solo antes e após a compactação.

Cada solo possui uma curva própria de peso volúmico aparente seco e teor em água para uma determinada energia de compactação. Há um teor em água óptimo para o qual resultam valores de densidade e resistência máximas. Numa mistura de solo-cimento, o teor em água óptimo conduz a valores máximos de densidade e, também conduz à máxima resistência (Specht, 2000).

Por este motivo, os solos estabilizados com cimento normalmente são compactados em campo com o teor em água óptimo para obtenção do peso volúmico seco máximo, como determinado no ensaio de compactação Proctor. Estudos mostram que em alguns casos, o teor em água que proporciona máxima resistência e durabilidade não é necessariamente igual ao teor em água que gera o maior peso volúmico seco (Lightsey et al, 1970 em Foppa 2005).

Geralmente, exige-se um grau de compactação no mínimo de 95%. O grau de compactação é definido como o quociente entre valor do peso volúmico seco efectivamente obtido pelo valor do peso volúmico seco pretendido. Este nível de compactação pode ser conseguido com dois teores em água diferentes, um abaixo e outro acima do óptimo. No campo, a obtenção de um adequado grau de compactação exige a determinação através de equipamentos próprios dos valores “in situ” e caso seja necessário terão que ser tomadas medidas para melhorar a densidade do solo. Assim, se o grau de

compactação estiver muito abaixo do ideal e com um teor em água inferior ao ótimo, deverá ser adicionada água à camada em causa em toda a sua extensão. Se pelo contrário, o grau de compactação não é o desejado, mas o teor em água está acima do ótimo, será necessário remexer a camada permitindo o seu arejamento e consequentemente a diminuição do teor em água através de secagem (Cruz, M., 2004).

Al-Amoundi et al (2010), observaram que o atraso na compactação das misturas de solo-cimento reduz significativamente a máxima resistência. A diminuição da resistência é mais acentuada nos momentos iniciais e tende a estabilizar passadas duas horas após a mistura dos materiais.

No campo, o tempo decorrido entre a mistura do solo, cimento e água e sua compactação varia normalmente 2 a 4 horas. A perda de resistência e durabilidade do solo-cimento resultante da demora na compactação da mistura fresca pode ser significativamente reduzida, em muitos casos, pela adição de uma percentagem adicional de água (Lightsey et al., 1970 em Foppa 2005).

Ingles e Metcalf (1972), referem que de similar importância à quantidade de cimento é a densidade da mistura compactada. Com o aumento da densidade, a resistência aumenta, a permeabilidade diminui até um valor mínimo, próximo do teor em água ótimo, depois começa a aumentar novamente.

Nos ensaios de compactação efectuados por Cruz, M., 2004, verificou-se para as misturas em estudo que a maior quantidade de partículas finas que a mistura contém à medida que se aumentou a quantidade de cimento, o teor em água ótimo sofreu um acréscimo e o peso volúmico seco máximo um decréscimo.

Muhunthan e Sariosseiri (2008), nos ensaios de compactação das misturas de solo-cimento em estudo observaram o mesmo que Cruz, M., o aumento do teor de cimento provocou um aumento no teor em água ótimo e uma diminuição no peso volúmico seco máximo.

Já no trabalho realizado por Al-Amoundi et al (2010), durante os ensaios de compactação das misturas de solo-cimento, observaram uma redução no teor em água e um aumento do peso volúmico seco máximo com o aumento da percentagem de cimento.

Ainda relativamente à compactação, Neves (1993) destaca a experiência francesa no que respeita ao tipo de ensaio e período de cura, em função da utilização pretendida para o solo estabilizado. Assim, o ensaio de compactação leve será mais adequado para o estudo de solos a utilizar em aterros, sendo a compactação pesada mais indicada para o caso dos solos utilizados em camadas de leito do pavimento.

3.3.5 Tempo de cura

O tempo de cura do solo-cimento é bastante importante pois o ganho de resistência da mistura é dependente do tempo, da temperatura e da presença de água. O tempo normal necessário, é

um período de cura adequado é de pelo menos 3 a 7 dias, durante o qual o equipamento mais pesado é normalmente proibido de circular sob a mistura de solo-cimento. No entanto, em caso de absoluta necessidade o tráfego local é muitas vezes permitido logo após a construção, desde que sejam tomadas precauções para que o revestimento de cura não seja danificado (ACI 230, 1990).

A qualidade final da camada estabilizada depende, em última análise, das condições de cura proporcionadas, pelo que o ambiente em que se dá a presa do cimento deve ter teores em água suficientes para que as reacções químicas se processem convenientemente. Para uma cura adequada deve proceder-se à cobertura da superfície de solo-cimento com uma emulsão betuminosa, ou em alternativa, poderá ser utilizada uma cobertura impermeável ou areia húmida. Deve ser protegida de congelamento durante o período de cura (Cruz M., 2004).

3.3.6 Presença de aditivos

Na estabilização de solos com cimento é possível utilizar aditivos para melhorar o comportamento das misturas ou reduzir o teor em cimento. Os aditivos mais vulgarmente utilizados têm sido o cloreto de cálcio e certos sais de sódio, nomeadamente o cloreto de sódio e o hidróxido de sódio.

O cloreto de cálcio em percentagens na ordem de 1% acelera a presa do cimento, sendo por isso usado como um acelerador de resistência, especialmente a baixas temperaturas. Dá também origem à libertação de iões de cálcio que serão absorvidos pela matéria orgânica ou que compensarão a perda de iões de cálcio que essa matéria provoca no cimento (Pereira, 1970).

O cloreto de sódio reduz a retracção das misturas de solo-cimento, estando as reduções de resistência associadas a este aditivo relacionadas com a dimensão do aditivo e não com a quantidade usada.

Relativamente ao hidróxido de sódio os estudos experimentais têm revelado que permite obter elevados aumentos de resistência nas misturas de solo-cimento quando teores baixos são incorporados nas misturas (Pereira, 1970).

No Quadro 3.1 estão resumidos os factores que mais afectam o comportamento das misturas de solo-cimento indicando-se se são adequados ou não para a mistura, isto é, se contribuem ou não para melhorar o comportamento das misturas de solo-cimento.

Quadro 3.1 - Factores que afectam o comportamento das misturas de solo-cimento

Factores		Adequado	Não adequado
Tipo de solo		Areias, siltes e argilas	Solos orgânicos e argilas altamente plásticas
Proporção e condições de mistura	Cimento	Até 16%	Mais do que 16%
	Água	Valor do teor em água perto do óptimo	Valor inferior à hidratação do cimento ou muito superior ao teor em água óptimo
Compactação		Valor aproximado do peso volúmico seco máximo	Menor que 95% do valor que se pretende
Tempo de cura		Mínimo 3, ideal 7 dias	Inferior a 3 dias
Presença de aditivos		Cloreto de cálcio, cloreto de sódio e hidróxido de sódio	Qualquer material prejudicial ao cimento (sulfatos)

3.4 Resistência à compressão simples

O ensaio de resistência à compressão simples tem sido utilizado em muitos programas experimentais descritos na literatura quando o objectivo é verificar o efeito do cimento na estabilização de solos, visto que este é um ensaio simples, de rápida execução, baixo custo e confiável (Consoli, N. et al, 2007), além de que a principal característica que sofre alteração no solo devido à adição de cimento é a resistência mecânica. Contudo, é sabido que, quando se utilizam misturas de solo-cimento como uma camada compactada sobre um solo de baixa capacidade de suporte, a rotura do sistema ocorre geralmente por tracção na base da camada estabilizada. Deste modo, parece mais razoável utilizar o ensaio de resistência à tracção como uma medida directa da resistência do solo-cimento. No entanto, diversos trabalhos (Ingles and Metcalf, 1972; Clough et al. 1981; Consoli et al 2001) demonstram que, normalmente, a resistência à tracção de misturas de solo-cimento varia entre 9 e 14% da resistência à compressão simples (Consoli, et al, 2007). Devido a esse facto bem como às vantagens enunciadas acima, o ensaio de resistência à compressão simples foi o adoptado para o estudo das características mecânicas do solo realizado neste trabalho.

Neste tipo de ensaios quando o objectivo é estudar o comportamento mecânico de solos estabilizados com cimento, é comum ensaiarem-se provetes da mistura de solo-cimento, com diferentes teores de cimento adicionados, avaliando-se a contribuição do cimento na resistência mecânica da mistura, ou estudarem-se diferentes tipos de solo com os mesmos teores de cimento adicionados e ensaiados para um mesmo tempo de cura, com o objectivo de se compararem as contribuições da adição do cimento em cada tipo de solo.

De seguida, são apresentados muito resumidamente os resultados e alguns gráficos obtidos em três trabalhos de investigação na avaliação da resistência mecânica de misturas de solo-cimento.

O primeiro trabalho apresentado é o estudo de um solo fabricado em laboratório ao qual foram adicionadas diferentes percentagens de cimento e posteriormente realizados ensaios de resistência à compressão simples para diferentes tempos de cura de forma a avaliar o comportamento das misturas ao longo do tempo.

O segundo trabalho apresentado é o estudo de três diferentes solos, aos quais foram adicionadas várias percentagens de cimento e realizados ensaios de resistência à compressão simples. Os ensaios foram sempre realizados para o mesmo tempo de cura (sete dias), com a finalidade de se compararem os valores máximos obtidos e o comportamento de cada solo com a mesma percentagem de cimento adicionada.

No terceiro trabalho foi realizado um estudo a um solo ao qual foram adicionadas diferentes percentagens de cimento. Foram moldados provetes com o mesmo teor em água mas com diferentes pesos volúmicos secos, para as diferentes percentagens de cimento estabelecidas. Com estes provetes, após um período de cura de sete dias, foram realizados ensaios de resistência à compressão simples. O objectivo foi verificar a contribuição da percentagem de cimento adicionada e a influência do peso volúmico seco na resistência mecânica das misturas.

No primeiro trabalho, efectuado por Cruz, 2004, que realizou ensaios de resistência à compressão simples a um tipo de solo com dois diferentes teores de cimento, estudando o comportamento mecânico do solo isolado e de duas misturas: solo com 6% de cimento e solo com 10% de cimento. O teor de cimento adicionado foi calculado em relação à massa de solo seco. Foram realizados ensaios de compactação Proctor para se determinar os valores do teor em água ótimo e o peso volúmico seco máximo do solo isolado e de cada mistura, com o objectivo de se fabricarem provetes com esses valores, a dimensão h/d (altura a dividir por diâmetro) dos provetes era de 1,5. O solo utilizado nos ensaios, foi um solo fabricado em laboratório e o cimento adicionado foi tipo Portland normal, os provetes depois de fabricados eram mantidos durante o período de cura a uma humidade sensivelmente constante de 100% e a uma temperatura $\pm 23^{\circ}\text{C}$, ao fim do tempo de cura era realizado o ensaio.

Um resumo das propriedades geotécnicas do solo usado neste trabalho é apresentado no Quadro 3.2:

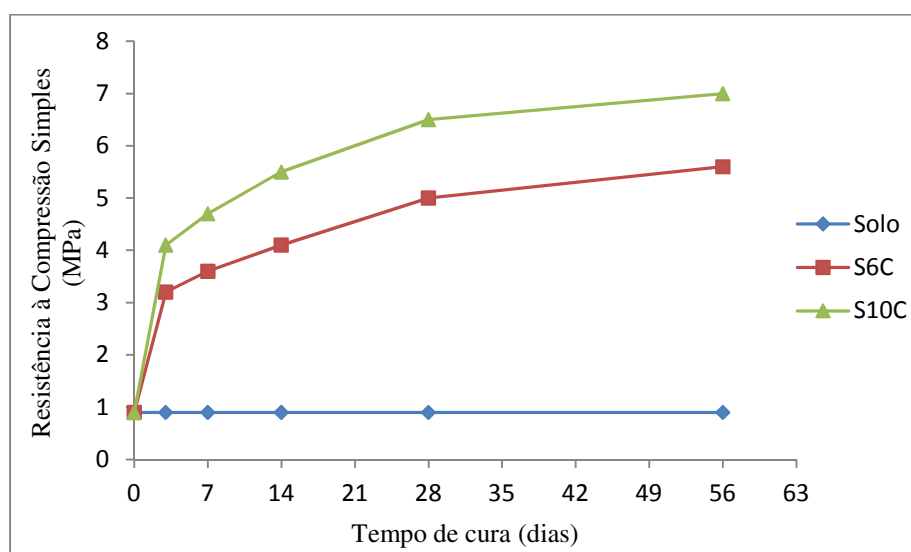
Quadro 3.2 - Propriedades geotécnicas do solo (Cruz, M., 2004)

Propriedade	Solo	Norma
Classificação Unificada	SC	ASTM D 2487
Classificação AASHTO	A-2-6	AASHTO M145-42
Limite de Liquidez (%)	36	NP 143
Limite de Plasticidade (%)	18,8	NP 143
Índice de Plasticidade (%)	17,2	NP 143
Peso máximo seco (kN/m^3)	20,3	LNEC-E262
Teor em água ótimo (%)	9,9	LNEC-E262

Os valores registados durante os ensaios de resistência à compressão simples para cada tempo de cura estipulado são apresentados no Quadro 3.3 e correspondem à média obtida numa série de três provetes ensaiados, o gráfico correspondente a esses valores é apresentado na Figura 3.2. Na Figura, a cor azul está representado o solo, a linha vermelha corresponde ao solo com 6% de cimento que no gráfico tem a nomenclatura S6C e a verde está o solo com 10% de cimento, com a nomenclatura S10C.

Quadro 3.3 - Resistência à compressão simples (Cruz, M., 2004)

% Cimento	Tempo de cura						Unidades
	0 Dias	3 Dias	7 Dias	14 Dias	28 Dias	56 Dias	
0	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	MPa
6	0,9	3,2	3,6	4,1	5,0	5,6	MPa
10	0,9	4,1	4,7	5,5	6,5	7,0	MPa

**Figura 3.2 - Resistência à compressão simples (Cruz, M., 2004)**

Na Figura 3.2 pode observar-se que foi nos primeiros 7 dias de cura que se alcançaram os maiores ganhos de resistência. Após este período, a resistência continua a aumentar mas não de forma tão elevada. Observa-se também que a diferença entre a resistência máxima registada aos 28 dias entre as misturas S6C e S10C é de 1,5 MPa e esta diferença aos 56 dias de cura é sensivelmente a mesma, é de 1,4 MPa, isto é, não foi por a mistura S10C ter uma maior percentagem de cimento que registou um maior aumento de resistência ao longo do tempo em relação à mistura S6C.

No trabalho efectuado por Muhunthan e Sariosseiri, 2008, realizaram-se ensaios de resistência à compressão simples a três diferentes solos (Aberdeen, Everett e Palouse) no Estado de Washington. A cada solo foram adicionadas cinco percentagens de cimento tipo Portland normal, 0, 2,5, 5, 7,5 e 10% em relação à massa de solo seco. Foram realizados ensaios de compactação Proctor para se determinar o teor em água óptimo e o peso volúmico seco máximo de cada mistura, com o objectivo de se moldarem provetes com esses valores e posteriormente se realizarem ensaios de resistência à compressão simples a cada um dos solos aos sete dias de cura, pretendendo-se avaliar a resistência mecânica alcançada pela adição do cimento em cada solo. Durante a cura os provetes eram colocados num recipiente completamente fechado de modo a manter-se o teor em água pretendido. A dimensão dos provetes h/d (altura a dividir por diâmetro) era de 2,3.

No Quadro 3.4 é apresentado um resumo das propriedades geotécnicas de cada um dos solos.

Quadro 3.4 - Propriedades geotécnicas dos solos de Washington (Muhunthan e Sariosseiri, 2008)

Propriedade	Aberdeen	Everett	Palouse	Norma
Classificação Unificada	ML	SP-SM	ML-CL	ASTM D 2487
Limite de Liquidez (%)	54,2	32,5	33,1	ASTM D 4318
Limite de Plasticidade (%)	42,8	29,3	19,6	ASTM D 4318
Índice de Plasticidade (%)	11,4	3,2	13,6	ASTM D 4318
Peso máximo seco (kN/m ³)	14,3	18,7	17,3	ASTM D 698
Teor em água óptimo (%)	27	9,7	17	ASTM D 698

Nas Figuras 3.3, 3.4 e 3.5 e no Quadros 3.5, 3.6, 3.7 são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão simples para cada um dos solos, com as diferentes percentagens de cimento adicionadas.

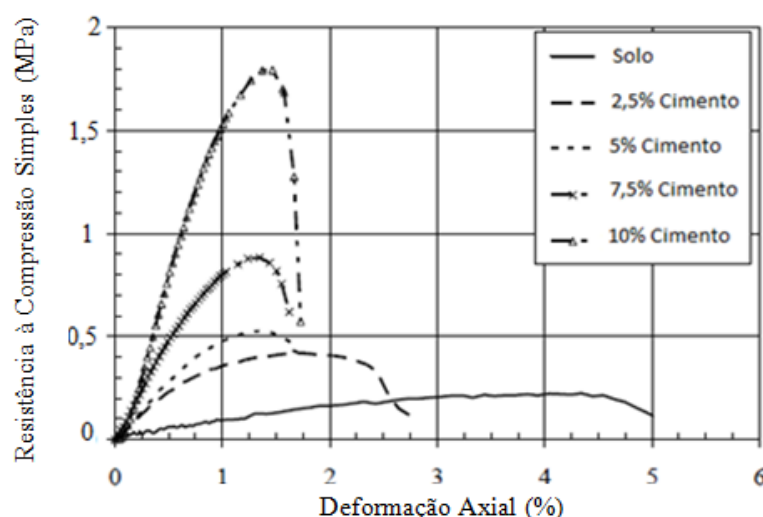


Figura 3.3 - Solo Aberdeen (Muhunthan e Sariosseiri, 2008)

Quadro 3.5 - Resistência à Compressão Simples - Solo Aberdeen (Muhunthan e Sariosseiri, 2008)

Solo	% Cimento	Resistência máxima (MPa)	Deformação máxima (%)
Solo de Aberdeen	0	0,212	4,4
	2,5	0,389	1,75
	5	0,534	1,4
	7,5	0,844	1,4
	10	1,735	1,5

Para um solo de Aberdeen, o valor do maior ganho de resistência foi no intervalo de 7,5% para 10% de cimento adicionado ao solo. Comparando os valores de resistência máxima do solo com 7,5% de cimento e o valor de resistência máxima do solo com 10% de cimento, observa-se que o valor passa para mais do dobro, é quando este dá o maior “salto”, o que não sucede nos outros intervalos, onde os ganhos de resistência são muito menores. Observa-se que para este solo a adição de mais 2,5% cimento no patamar dos 5 para os 7,5% corresponde a um ganho de 0,310 MPa, e no patamar dos 7,5 para os 10%, com a adição da mesma percentagem de cimento, o ganho de resistência é de 0,891 MPa, um valor cerca de três vezes maior, este exemplo destaca o facto da difícil previsão quantitativamente do ganho de resistência das misturas de solo-cimento.

Na Figura 3.4 são apresentados os gráficos correspondentes ao comportamento do solo Everett nos ensaios de resistência à compressão simples. No Quadro 3.6 são apresentados os valores máximos registados durante os ensaios.

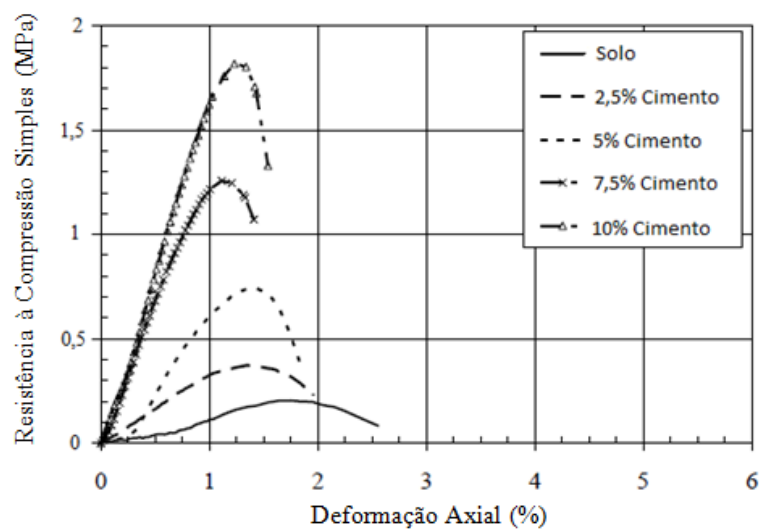


Figura 3.4 - Solo Everett (Muhuthan e Sariosseiri, 2008)

Quadro 3.6 - Resistência à Compressão Simples - Solo Everett (Muhunthan e Sariosseiri, 2008)

Solo	% Cimento	Resistência máxima (MPa)	Deformação máxima (%)
Solo de Everett	0	0,207	1,8
	2,5	0,371	1,5
	5	0,746	1,5
	7,5	1,202	1,2
	10	1,817	1,4

No caso de um solo da região de Everett observou-se que à medida que se aumentou a percentagem de cimento adicionada ao solo, o ganho de resistência em cada patamar registou valor mais elevado do que o anterior, o que não aconteceu para o solo Aberdeen. Com 10% de cimento o solo de Aberdeen e o solo de Everett registaram valores de resistência máxima aproximados.

Na Figura 3.5 são apresentados os gráficos correspondentes ao comportamento do solo de Palouse nos ensaios de resistência à compressão simples. A seguir à Figura, no Quadro 3.7 são apresentados os valores máximos registados durante os ensaios.

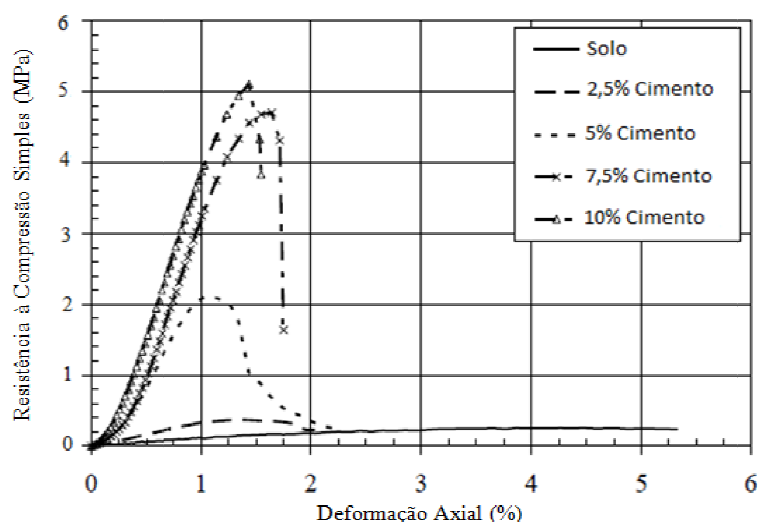


Figura 3.5 - Solo Palouse (Muhuthan e Sariosseiri, 2008)

Quadro 3.7 - Resistência à Compressão Simples - Solo Palouse (Muhunthan e Sariosseiri, 2008)

Solo	% Cimento	Resistência máxima (MPa)	Deformação máxima (%)
Solo de Palouse	0	0,294	5
	2,5	0,377	1,5
	5	2,070	1,2
	7,5	4,870	1,8
	10	5,037	1,5

Para um solo da região de Palouse, a valor da resistência máxima foi muito maior do que o registado para os outros dois solos com as mesmas percentagens de cimento. Inicialmente o solo isolado já tinha um valor de resistência máxima um pouco mais elevado do que os outros dois solos, mas a adição de cimento, levou a valores de resistência máxima muito superiores. A maior diferença no valor da resistência máxima foi do solo com 5 para 7,5% de cimento, em que se registou um ganho de 2,8 MPa.

No âmbito de outro trabalho (Foppa D., 2005), foram realizados ensaios de resistência à compressão simples sobre provetes de solo com diferentes percentagens de cimento. O solo utilizado é um solo residual de arenito da denominada Formação Botucatu e a este foram adicionadas as seguintes percentagens de cimento 1, 2, 3, 5 e 7%, calculadas em relação à massa de solo seco. Ao solo foram realizados ensaios de compactação Proctor com três energias de compactação diferentes: normal, intermediária e modificada. Foram moldados provetes para cada uma das percentagens de cimento e com diferentes pesos volúnicos secos, mas sempre com o mesmo teor em água ($w=10\%$), como se pode observar na Figura 3.6.

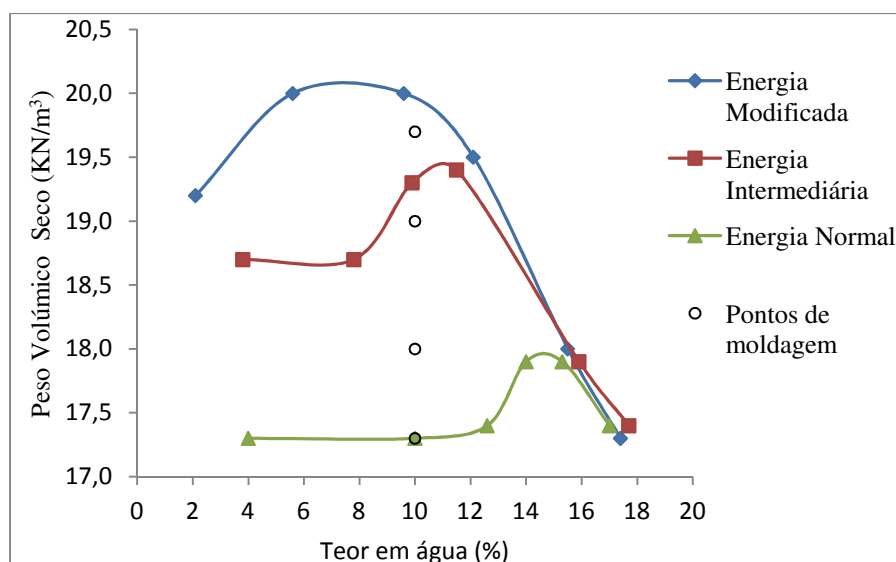


Figura 3.6 - Curvas de compactação e pontos de moldagem (Foppa D., 2005)

A posição dos pontos de moldagem foi estabelecida de modo a que estes ficassem compreendidos dentro de uma faixa de pesos volúnicos secos e teor em água exequíveis em campo, com o objectivo de estudar a influência da quantidade de cimento e do peso volúmico seco na resistência dos provetes. Os provetes utilizados nos ensaios tinham dimensão h/d (altura/diâmetro) de 2 e o cimento utilizado foi o cimento Portland de alta resistência inicial, este atinge aos 7 dias de idade cerca de 80% da resistência obtida aos 28 dias. Os provetes depois de moldados eram acondicionados num saco plástico adequadamente vedado para evitar variações significativas do teor em água e curados por um período de 7 dias num ambiente de temperatura e humidade controlados. Após os 7 dias de cura e imediatamente antes do ensaio, os provetes eram retirados para realização dos ensaios de resistência à compressão simples.

Um resumo das propriedades geotécnicas do solo usado neste trabalho é apresentado no Quadro 3.8, os valores apresentados no Quadro para o peso volúmico seco máximo e teor em água óptimo são correspondentes ao Proctor modificado.

Quadro 3.8 - Propriedades geotécnicas do solo (Foppa. D, 2005)

Propriedade	Solo	Norma
Classificação Unificada	areia fina siltosa	NBR 6502/95
Limite de Liquidez (%)	23	NBR 6459/84
Limite de Plasticidade (%)	13	NBR 7180/84
Índice de Plasticidade (%)	10	-
Peso máximo seco (kN/m³)	20,1	NBR 7182/86
Teor em água óptimo (%)	7,5	NBR 7182/86

Na Figura 3.7 são apresentados os valores obtidos nos ensaios de resistência à compressão simples. Cada ponto corresponde à média do conjunto de 3 provetes moldados com características idênticas (igual percentagem de cimento e mesmo peso volúmico seco) e todos os pontos possuem um teor em água ($w=10\%$). Como cada ponto foi moldado com 5 diferentes percentagens de cimento (1, 2, 3, 5 e 7%), foi possível avaliar a influência deste, visto que, para um mesmo ponto, foi mantido constante o peso volúmico seco e o teor em água, apenas aumentando a quantidade de cimento adicionada.

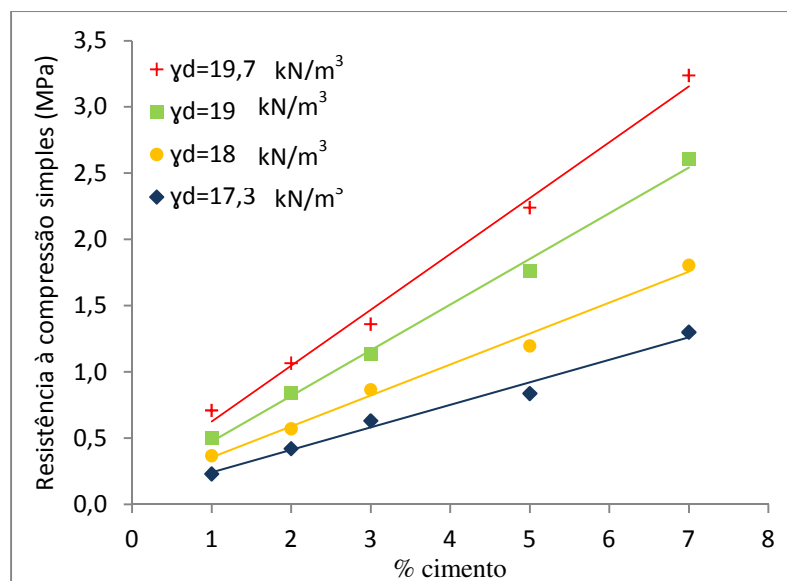


Figura 3.7 – Variação da resistência à compressão simples em relação ao teor de cimento (Foppa, D. 2005)

Pode observar-se que a quantidade de cimento tem um grande efeito sobre a resistência à compressão simples do material. Mesmo pequenas adições de cimento são suficientes para produzir ganhos de resistência. Quando se aumentou a quantidade de cimento de 1% para 7%, a resistência à compressão simples, em média, quintuplicou. Verifica-se também que, na faixa de teores estudados, a resistência à compressão simples aumenta linearmente com o aumento da quantidade de cimento. Além disso, a taxa de aumento da resistência, representada pela inclinação das rectas de ajuste, aumenta com o aumento do peso volúmico seco, indicando que a efectividade da cimentação é maior nas misturas mais compactadas. A existência de um número maior de contactos e, consequentemente, a maior possibilidade do cimento promover a união das partículas nesses contactos parece ser a causa desse fenómeno.

Para qualquer um dos solos estudados nos diferentes trabalhos apresentados, o acréscimo da percentagem de cimento adicionada provocou sempre um aumento de resistência à compressão simples. Contudo, consegue observar-se que cada solo teve um comportamento distinto, atingindo valores de resistência máxima diferentes para cada percentagem de cimento adicionada. Observou-se

também a influência do tempo de cura e do peso volúmico seco na resistência final das misturas de solo-cimento. A apresentação dos resultados destes trabalhos servirá como base para analisar os resultados obtidos durante os ensaios de resistência à compressão simples do programa experimental realizado neste trabalho. Não poderá servir de termo de comparação, porque os factores que afectam o comportamento das misturas de solo-cimento são diferentes, como por exemplo, as quantidades de cimento adicionadas às misturas, o tipo de cimento, o tempo de cura, o solo, os valores do teor em água e peso volúmico seco máximo.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

4.1 Introdução

O programa experimental foi dividido em duas fases. Na primeira fase foi feita a classificação dos materiais utilizados: solo, cimento e água. A classificação do solo foi obtida a partir das propriedades determinadas num trabalho prévio realizado com o mesmo solo (Silva, M., 2010). Conforme a classificação obtida do solo e consultando os quadros do ACI que ditam as percentagens típicas de cimento de acordo com a classificação dos solos, estabeleceram-se as quantidades de cimento a usar para este tipo de solo. Decidiu-se estudar três diferentes misturas: solo isolado e mistura de solo com 8 e 12% de cimento relativamente ao solo seco. Em seguida, realizaram-se ensaios de compactação Proctor sobre as três misturas com a finalidade de se determinar os valores do teor em água ótimo e do peso volumico seco máximo de cada mistura.

A segunda fase consistiu na moldagem e cura de provetes com as quantidades estabelecidas de cimento, água e solo de modo a obter-se provetes com os valores do teor em água ótimo e peso volumico seco máximo de cada mistura obtidos anteriormente. No final, descreve-se o modo de realização dos ensaios de resistência à compressão simples deste trabalho.

4.2 Materiais Utilizados

4.2.1 Solo

O solo utilizado é proveniente dos Capuchos, no concelho de Almada cuja localização é apresentada nas Figuras 4.1 e 4.2. Estes solos pertencem à unidade de Cotter (1956) das Argilas azuis de Xabregas. De acordo com a Notícia Explicativa da Folha 34 – D – Lisboa, da carta geológica de Portugal, trata-se de um conjunto silto-argiloso, por vezes com areias finas, de cor cinzento azulado. Esta unidade representa a maior transgressão de todo o Miocénico e data do Serravaliano (Silva, M., 2010).



Figura 4.1– Local de recolha do solo nos Capuchos (Google Earth – Silva, M. 2010)

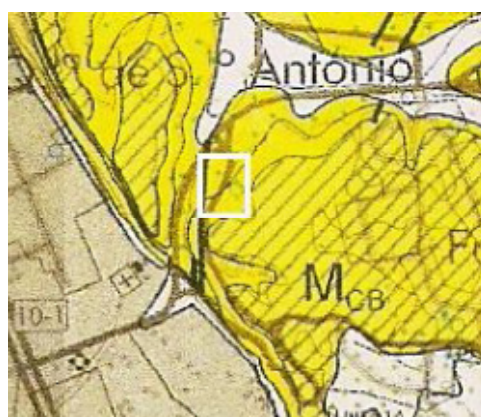


Figura 4.2 - Extracto da carta geológica de Portugal, na escala 1:50 000, com destaque na zona de recolha (Silva, M. 2010)

Este solo foi escolhido porque estes terrenos pelíticos estendem-se entre a auto-estrada A2 e a Costa de Caparica, ao longo de grande parte da superfície planáltica das colinas de Almada e, a partir daí, ocupam a encosta suave que desce sobre a via rápida IC 20. Toda esta área apresenta uma morfologia suave, favorecida pela estrutura das camadas miocénicas inclinando 5 a 8° para SSE, o que a torna particularmente atractiva para a construção. De facto, é sobre estes terrenos que, desde há algumas décadas, a cidade de Almada tem vindo a crescer na sua expansão para leste na direcção da Costa de Caparica. Outra razão foi pelo facto de este solo possuir fraca qualidade, fazendo deste um material que necessita de algum tipo de melhoria se for empregue sob condições mais severas do ponto de vista da engenharia (Silva, M., 2010). E também o facto de não haver estudos sobre este solo estabilizado com cimento, para se saber o seu comportamento mecânico e por último a proximidade geográfica dos locais de amostragem em relação à FCT/UNL também contribuiu para a escolha do solo.

A amostra de solo foi recolhida no seu estado natural, mediante escavação com ferramenta manual, em quantidade suficiente para a realização de todos os ensaios previstos. A amostra assim

obtida foi armazenada e transportada em caixotes de plástico adequadamente vedados. Durante a recolha e transporte, todos os cuidados foram tomados no sentido de se evitar a contaminação da amostra.

Para a caracterização do solo, determinou-se o teor de matéria orgânica realizou-se a análise granulométrica e determinaram-se os limites de consistência. Como já referido, os valores obtidos resultam de um trabalho prévio realizado com o mesmo solo.

Para a determinação do teor de matéria orgânica foi seguido um protocolo interno do Departamento de Ciências da Terra da FCT-UNL que consiste, de uma forma resumida, na queima da matéria orgânica a 450°C e que compreende os seguintes passos: secam-se amostras de solo com cerca de 20 g na estufa a 110°C durante, pelo menos, 48 horas, de forma a extrair a água por evaporação. As amostras são pesadas após arrefecimento. O passo seguinte é queimar a matéria orgânica existente nas amostras, colocando-as na mufla a 450°C durante, pelo menos, 1 hora. As amostras são de novo pesadas após arrefecimento. A diferença entre as duas pesagens corresponde à massa de matéria orgânica contida nas amostras.

O solo utilizado apresentou um teor de matéria orgânica de 0,86% inferior ao valor 2%, obedecendo assim ao requisito da especificação do LNEC E 243 - 1971 (Solo. Solo-cimento).

A análise granulométrica das partículas com diâmetro superior a 0,075 mm foi executada de acordo com a especificação LNEC E 239 – 1970 (Solos. Análise granulométrica por peneiração húmida). A fracção restante foi analisada recorrendo ao método de sedimentação, descrito na especificação LNEC E 196 - 1966 (Solos. Análise granulométrica). Na Figura 4.3 é apresentada a curva granulométrica do solo.

A obtenção dos valores dos limites de consistência ou de Atterberg, seguiu o procedimento descrito na norma portuguesa NP 143 - 1969 (Solos. Determinação dos limites de consistência). Os valores obtidos para o solo em estudo foram: 39% para o limite de liquidez, 25% para o limite de plasticidade e 14% para o índice de plasticidade.

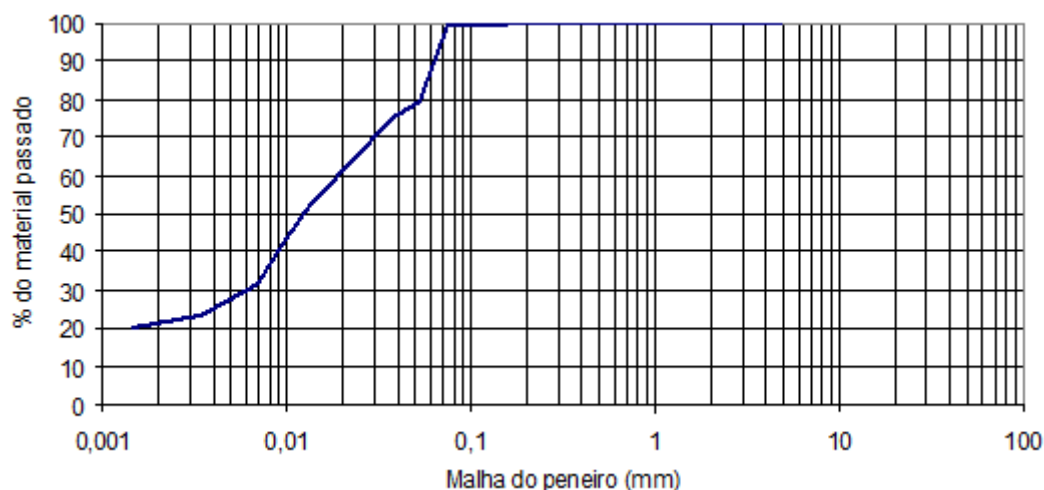


Figura 4.3- Curva granulométrica do solo (Silva, M., 2010)

Na curva granulométrica do solo, a percentagem de material passado nos peneiros ASTM de malha 50.0 e 4.74 mm foi de 100% para os dois casos e o valor obtido para os limites de consistência, foi de 39% para o limite de liquidez. Os valores obtidos para o solo em estudo cumprem a especificação do LNEC E243 – 1971 (Solo. Solo-cimento) que determina as características dos solos a estabilizar com cimento em termos de granulometria e de limites de consistência. A especificação refere que para o peneiro de malha 50.0 e 4.74 mm a percentagem de material passado deve ser igual ou superior a 80 e 45% e o valor do limite de liquidez inferior a 45%.

Com base nos ensaios de caracterização acima enunciados, a análise granulométrica e a determinação dos limites de consistência, foi feita a classificação do solo. Foram feitas duas classificações: a classificação Unificada e a classificação para fins rodoviários AASHTO. Para os solos finos, interessa sobretudo a sua plasticidade, mais do que a informação proveniente da sua curva granulométrica. Desta forma, para a classificação de um solo fino recorre-se à Carta de Plasticidade que utiliza os símbolos da Classificação Unificada. Colocando os valores do índice de plasticidade e do limite de liquidez anteriormente apresentados numa carta de plasticidade, o resultado que se obtém é o seguinte:

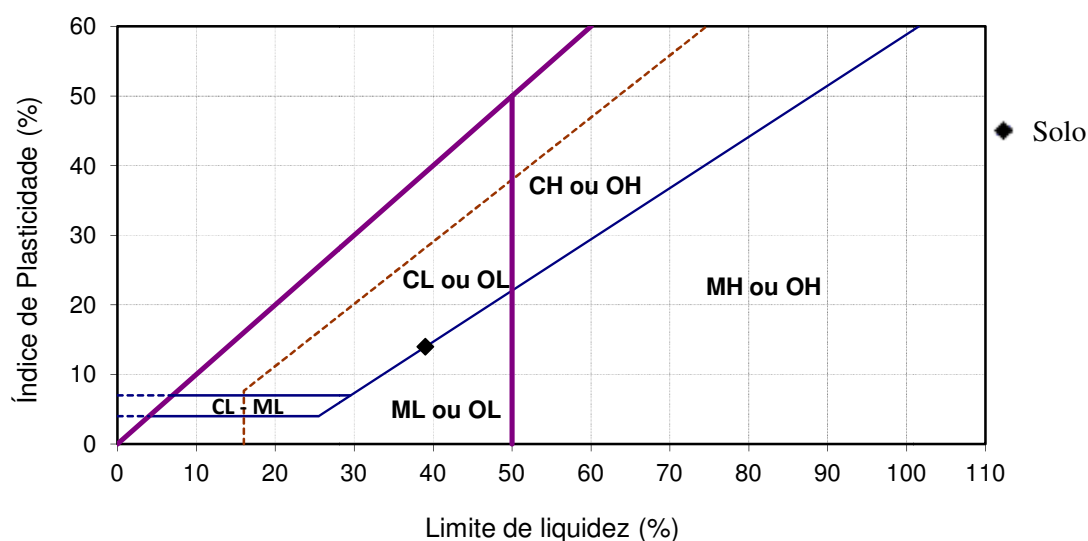


Figura 4.4 – Carta de Plasticidade

Segundo a Classificação Unificada proposta pela norma da ASTM D2487 (Standard Classification of Soils for Engineering Purposes), o solo em estudo é designado por Argila Magra (classe - CL).

Quanto à classificação para fins rodoviários AASHTO M145-42, o solo em estudo possui mais de 35% de material que passa no peneiro nº200 (percentagem de finos é superior a 35%), o seu limite de liquidez é de 39% e o índice de plasticidade é de 14%, insere-se assim no grupo A-6 – Solos

Argilosos, onde o limite de liquidez no máximo pode atingir o valor de 40% e um valor mínimo de índice de plasticidade igual a 11%. A classificação do solo inclui ainda, o índice de grupo, que se apresenta entre parêntesis à frente do grupo, ou sub-grupo, para este solo é designada por A-6 (14). O índice de grupo é calculado pela expressão 4.1:

$$IG = (F - 35) \times [0,2 + 0,005 \times (w_L - 40)] + 0,01 \times (F - 15) \times (IP - 10) \quad (4.1)$$

$$(F = 93)$$

F – é a percentagem de finos (% de solo passado no peneiro nº 200, excluindo o material retido no peneiro de 75 mm);

w_L – é o limite de liquidez;

IP – é o índice de plasticidade.

Segundo a classificação de solos para fins rodoviários, observa-se que este solo possui um comportamento “regular a mau” para esse efeito, tendo portanto que se adicionar uma maior percentagem de cimento para a sua estabilização, quando comparado com outros solos que possuem melhor comportamento.

No Quadro 4.1 é apresentado um resumo das propriedades geotécnicas do solo em estudo.

Quadro 4.1 - Propriedades geotécnicas do solo

Propriedade	Solo	Norma
Classificação Unificada	CL	ASTM D 2487
Classificação AASHTO	A-6	AASHTO M145-42
Limite de Liquidez (%)	39	NP 143
Limite de Plasticidade (%)	25	NP 143
Índice de Plasticidade (%)	14	NP 143
Teor de Matéria Orgânica (%)	0,86	Protocolo FCT

Após determinação das propriedades geotécnicas, a preparação das amostras de solo para a realização dos ensaios de compactação Proctor e posterior moldagem dos provetes envolveu os seguintes procedimentos: secagem ao ar, desagregação e remoção de pequenas raízes que se encontravam neste. Na Figura 4.5 é apresentada uma imagem do solo espalhado sobre uma superfície de plástico na bancada do laboratório de modo a proceder à sua secagem.



Figura 4.5 - Secagem do solo

O solo assim preparado era armazenado em caixotes de plástico devidamente identificados e vedados até à data da sua utilização.

4.2.2 Cimento

Dos vários tipos de cimento existentes, o utilizado foi o cimento Portland IV, classificação obtida com base na norma do IPQ (Instituto Português da Qualidade), NP EN 197-1. É um cimento pozolânico de alta resistência química utilizado no fabrico de betões e argamassas sujeitos a ambientes agressivos e em todas as obras com exigências específicas de durabilidade. É especialmente indicado para pavimentos rodoviários, betonagens em meios agressivos, ambiente marítimo e misturas de solo-cimento. As características principais deste cimento são: cor acinzentada, bom comportamento em ambientes agressivos e elevada impermeabilidade em idades avançadas.

O cimento pozolânico contém a adição de pozolana no teor que varia de 15 a 50% em massa. Esse alto teor de pozolana confere ao cimento uma alta impermeabilidade e consequentemente durabilidade, proporciona estabilidade em ambientes de ataque ácido, em especial de ataque por sulfatos. O uso deste cimento confere resistência mecânica à compressão superior ao cimento comum (tipo I) a longo prazo.

O cimento utilizado foi armazenado em recipiente de plástico e adequadamente vedado para evitar sua hidratação prematura em função da humidade do ar.

4.2.3 Água

Além do solo e do cimento, o componente essencial das misturas é a água, uma vez que o cimento é um ligante hidráulico, ou seja, só ganha presa quando na presença desta. As características a que este material deve obedecer encontram-se fixadas na especificação do LNEC E304-1974

(Pavimentos rodoviários. Solo-cimento.). Segundo esta especificação a água não deve conter óleos, ácidos ou qualquer outra substância prejudicial ao cimento, podendo ter até 36g/l de sais em solução, até 5g/l de matéria orgânica e substâncias em suspensão e até 0.2% de sulfatos (quando somada com a percentagem de sulfatos do solo). A água utilizada neste trabalho foi água da rede pública admitindo-se que todas as condições referidas se encontram garantidas.

4.3 Misturas de solo-cimento

4.3.1 Percentagem de cimento adoptada

Após classificação obtida para o solo, foram definidas as percentagens de cimento para a fabricação dos provetes. Segundo o Quadro 4.2, a percentagem de cimento recomendada para um solo classificado do tipo A-6, varia entre os 9 e os 15%, sendo o valor típico usado neste tipo de solo igual a 12% de cimento. Consoante estes dados foram definidas as percentagens de cimento utilizadas para o solo a estabilizar: 12% visto ser a típica percentagem para este tipo de solo, e 8%, um valor percentual abaixo do recomendado. As percentagens de cimento foram determinadas em relação à massa de solo seco.

Quadro 4.2 - Percentagens de cimento típicas para vários tipos de solo (ACI 230, 1990)

Classificação AASHTO solo	Classificação ASTM solo	Intervalo de percentagem de cimento	Percentagem típica de cimento	Percentagens de cimento para testes de durabilidade
A-1-a	GW, GP, GM, SW, SP, SM	3 – 5	5	3 – 5 – 7
A-1-b	GM, GP, SM, SP	5 – 8	6	4 – 6 – 8
A-2	GM, GC, SM, SC	5 – 9	7	5 – 7 – 9
A-3	SP	7 – 11	9	7 – 9 – 11
A-4	CL, ML	7 – 12	10	8 – 10 – 12
A-5	ML, MH, CH	8 – 13	10	8 – 10 – 12
A-6	CL, CH	9 – 15	12	10 – 12 – 14
A-7	MH, CH	10 – 16	13	11 – 13 – 15

Analísaram-se três tipos de misturas: solo, solo com 8% de cimento e solo com 12% de cimento. Para cada tipo de mistura foi criada uma nomenclatura, para designar a inclusão do cimento adoptou-se a letra “C” estando o valor da percentagem deste constituinte antes da respectiva letra de designação. A nomenclatura S8C refere-se a misturas de solo com 8% de cimento, a nomenclatura S12C representa as misturas de solo com 12% cimento, a letra “S” corresponde a provetes constituídos

só por solo. No Quadro 4.3 apresenta-se um resumo com as nomenclaturas das três misturas. As percentagens de cimento adicionadas foram sempre calculadas em relação à massa de solo seco.

Quadro 4.3 - Nomenclaturas utilizadas na identificação dos provetes

Solo	S
Solo com 8% cimento	S8C
Solo com 12% cimento	S12C

O cimento a usar em obra deve ser do mesmo tipo e marca do utilizado nos ensaios laboratoriais. Existe ainda, um factor importante a ser considerado: o processo de construção em campo é menos eficiente que a moldagem dos provetes no laboratório e por isso a quantidade de cimento a ser adoptada na prática deve ser maior do que a determinada no laboratório. A quantidade de cimento determinada em testes laboratoriais deve ser multiplicada por 1,66 para superar as dificuldades de campo (Foppa, 2005).

4.3.2 Ensaios de compactação

Após a fase inicial de classificação do solo e definidas as percentagens de cimento a adicionar, é necessário para a preparação posterior dos provetes, realizar o ensaio de compactação ao solo isolado e às misturas de solo-cimento, com o objectivo de determinar os valores do teor em água óptimo e do peso volúmico seco máximo das misturas em estudo.

O cálculo do teor em água e peso volúmico seco são realizados com as seguintes expressões 4.2 e 4.3:

$$w = \frac{W_w}{W_s}, \quad (4.2)$$

w – teor em água;

W_w – peso da água;

W_s – peso das partículas sólidas.

$$\gamma_d = \frac{100 \times \gamma}{100 + w}, \quad (4.3)$$

γ_d – peso volúmico seco;

γ – peso volúmico, é o quociente entre o peso e volume do provete;

w – teor em água.

No que diz respeito à compactação do solo isolado e das misturas de solo-cimento, seguiu-se a tendência actual que é o uso da compactação pesada para fins rodoviários como foi referido no ponto 3.3.4, tendo sido utilizado o molde pequeno e o pilão de compactação pesada. O ensaio de compactação Proctor ao solo isolado foi realizado segundo a especificação do LNEC E 197 – 1966 (Solos – Ensaio de compactação).

O resultado do ensaio de compactação Proctor ao solo isolado é apresentado na Figura 4.6:

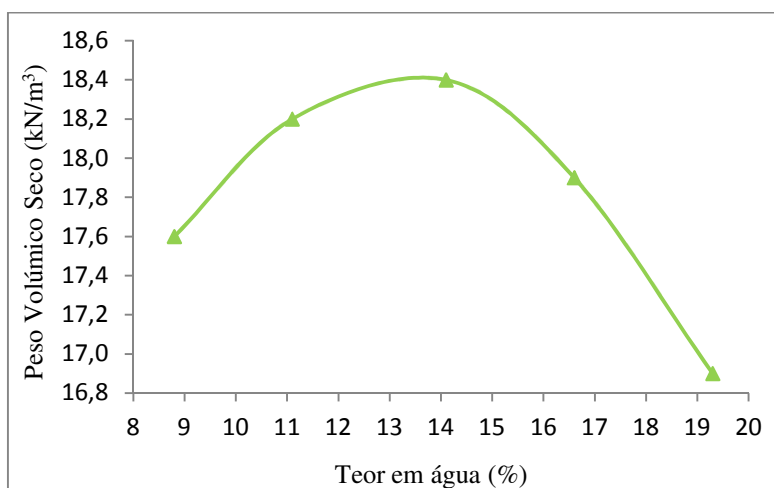


Figura 4.6 - Curva de Compactação do Solo

Da curva de compactação do solo obtém-se para o teor em água óptimo um valor de 13,1% a que corresponde um peso volúmico seco máximo igual a 18,4 kN/m^3 . O teor em água óptimo permite estabelecer a quantidade de água para cada provete de dimensão conhecida, pois pretende-se que eles tenham aquele teor em água.

Na compactação das misturas de solo-cimento, calculou-se a percentagem de cimento fixada previamente em relação à massa de solo seco, procedeu-se à mistura do solo, cimento e água. A quantidade de água foi adicionada de modo a conferir à mistura um teor em água acima e abaixo em 4 a 6% em relação ao teor óptimo estimado para o solo. O ensaio foi realizado segundo a especificação E LNEC 262 – 1971 (Solo-cimento – Ensaio de compactação), com o objectivo de se determinar o valor do teor em água óptimo de cada mistura.

O objectivo de se terem determinado os valores do teor em água óptimo e do peso volúmico seco máximo para cada mistura teve como finalidade realizarem-se provetes com valores iguais ou muito próximos destes, visto que este é o ponto que conduz à máxima resistência.

Na Figura 4.7 são apresentadas as curvas de compactação das misturas de solo-cimento com 8 e 12% de cimento. Inclui-se também a curva de compactação do solo isolado obtida anteriormente.

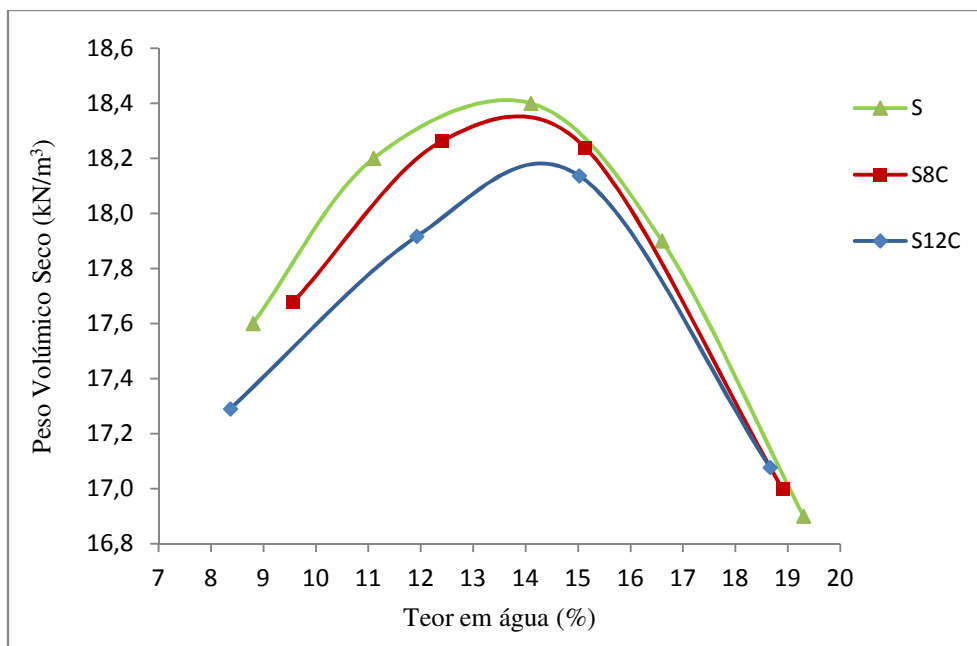


Figura 4.7 - Curvas de Compactação

Na Figura observa-se que, à medida que se aumenta a quantidade de cimento, o teor em água ótimo sofre um acréscimo e o peso volúmico seco máximo um decréscimo, o que está de acordo com o ACI 230 (1990) segundo o qual, a adição de cimento ao solo, de uma forma geral aumenta o teor em água ótimo e diminui o peso volúmico seco máximo. No entanto, a direcção desta mudança às vezes não é previsível. A formação de núcleos interligados distribuídos pela massa de solo tende a produzir um aumento no teor em água ótimo e uma diminuição no peso volúmico seco, enquanto a elevada densidade das partículas sólidas de cimento em relação à do solo tende a produzir um aumento no peso volúmico seco.

A partir da Figura 4.7, os valores obtidos do ensaio de compactação Proctor para as três misturas em estudo estão apresentados no Quadro 4.4:

Quadro 4.4 - Valores das Curvas de Compactação

Mistura	w opt (%)	γ_d (kN/m ³)
S	13,1	18,4
S8C	13,5	18,3
S12C	14,1	18,1

Após determinação dos valores de teor em água ótimo e peso volúmico seco máximo de cada mistura procedeu-se à moldagem e cura dos provetes.

4.4 Moldagem e cura dos provetes

Com as características de moldagem dos provetes determinadas, o teor em água ótimo e o peso volúmico seco máximo obtidos nos ensaios de compactação realizados, procedeu-se à moldagem dos vários provetes para posteriormente se efectuarem os ensaios de resistência à compressão simples.

Para as misturas S8C e S12C foram definidos quatro tempos de cura de 0, 7, 28 e 90 dias após a realização dos provetes. Os tempos de cura foram estabelecidos tendo em conta o ganho habitual de resistência do cimento utilizado nas misturas, e com o propósito de se verificar o aumento da resistência esperado ao longo do tempo. Para cada tempo de cura foram moldados três provetes de cada mistura, num total de vinte e sete provetes: três provetes de solo (S), doze provetes de solo com 8% de cimento (S8C) e doze provetes de solo com 12% de cimento (S12C).

Para a moldagem dos provetes foi utilizado o molde pequeno do ensaio de compactação Proctor, moldando-se provetes cilíndricos com as seguintes dimensões: 102 mm de diâmetro e 117 mm de altura.

Como já referido, a preparação dos provetes foi feita de modo a obterem-se os valores pretendidos do teor em água ótimo e peso volúmico seco máximo. Em primeiro lugar determinou-se o teor em água natural do solo. Com o teor em água natural determinaram-se as massas de água e de solo seco existentes numa determinada quantidade de solo. As diferentes quantidades de cimento a adicionar à mistura foram calculadas em relação à massa de solo seco. A quantidade de água para o teor em água ótimo foi calculada em relação à soma das quantidades de cimento e solo seco para obter o valor pretendido. Após a determinação das quantidades de água e cimento a adicionar ao solo, misturaram-se os materiais de forma a obter uma mistura homogénea. Em seguida efectuou-se a compactação dos provetes com a mesma energia de compactação usada nos ensaios de compactação Proctor.

No final da compactação e mesmo antes da extracção do provete retirava-se a alonga do molde ficando sempre uma parte da mistura compactada acima do limite do molde que era rasoiada de modo a que a superfície do provete ficasse completamente lisa e plana. Quando se rasoiava eram retiradas e colocadas em cápsulas duas pequenas amostras da mistura que eram colocadas na estufa durante 24h à temperatura de 105°C para determinação do teor em água do provete. A média dos dois teores em água medidos de cada cápsula era o valor adoptado como sendo o teor em água de cada provete obtido em estufa. No anexo é descrito este procedimento de forma mais pormenorizada, assim como os cálculos realizados e quantidades utilizadas para a obtenção dos valores pretendidos.

Em seguida o provete era extraído do molde com o extractor de provetes representado na Figura 4.8 e a sua massa e dimensões (diâmetro e altura) devidamente anotadas.



Figura 4.8 - Extração do Provede

Na Figura 4.9 estão representados dois provedes de solo-cimento após a sua extração do molde.



Figura 4.9 - Provedes

No final, foram considerados aptos para os ensaios os provedes que respeitavam as seguintes tolerâncias.

- Peso volúmico seco (γ_d): grau de compactação no mínimo de 95% sendo o grau de compactação definido como o valor de γ_d efectivamente obtido na moldagem dividido pelo valor de γ_d definido como meta (Exemplo: para $\gamma_d = 18,1 \text{ kN/m}^3$ considerou-se aceitáveis provedes que apresentaram valores de γ_d maiores ou iguais a $17,2 \text{ kN/m}^3$).
- Teor em água (w): valor especificado ± 2 pontos percentuais (Exemplo: para um objectivo de $w = 14\%$ foram aceites valores compreendidos entre 12% e 16%).
- Dimensões: diâmetro $102 \pm 1 \text{ mm}$ e altura $117 \pm 1 \text{ mm}$

Em seguida, o provede era acondicionado num saco plástico adequadamente identificado e vedado para evitar variações significativas de humidade (Figura 4.10).



Figura 4.10 - Identificação dos provetes

Por último, os provetes eram armazenados e curados durante o período de cura definido num ambiente com temperatura e humidade controladas (temperatura de $23^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{C}$ e humidade relativa do ar aproximadamente 55%) numa sala de temperatura e humidade controladas do DEC – FCT/UNL. Após o tempo de cura os provetes eram retirados da sala para serem realizados os ensaios de resistência à compressão simples.

Nas Figuras 4.11 a 4.13 estão representados os valores obtidos do teor em água e peso volúmico seco de cada provete, juntamente com a curva de compactação respectiva, obtidas anteriormente, de modo a mostrar-se a localização dos valores obtidos em cada curva de compactação. A Figura 4.11 corresponde ao solo isolado, as Figuras 4.12 e 4.13 correspondem à mistura de solo com 8% de cimento (S8C) e à mistura de solo com 12% de cimento (S12C), respectivamente.

A seguir a cada Figura estão apresentados nos Quadros 4.5, 4.6 e 4.7, os valores correspondentes a cada provete. Todos os provetes têm valores cujos parâmetros de moldagem ficaram dentro das respectivas tolerâncias enunciadas. Sempre que algum provete não respeitava estas tolerâncias era rejeitado, sendo realizada uma nova mistura até que se obtivessem o conjunto de três provetes dentro das tolerâncias requeridas.

Nos mesmos Quadros, 4.5 a 4.7 são apresentados os valores do teor em água, peso volúmico seco, o grau de compactação, dimensões e massa obtidos para cada provete, de cada uma das misturas; no Quadro 4.5 para o solo, no Quadro 4.6 para a mistura S8C e no Quadro 4.7 para mistura S12C. Nestes Quadros os valores foram agrupados a cada três linhas, o que corresponde ao conjunto de provetes ensaiados para o mesmo tempo de cura. No caso dos provetes de solo, apenas se realizaram três provetes pois ao longo do tempo não se espera que o solo ganhe qualquer tipo resistência, mantendo sempre o valor inicial.

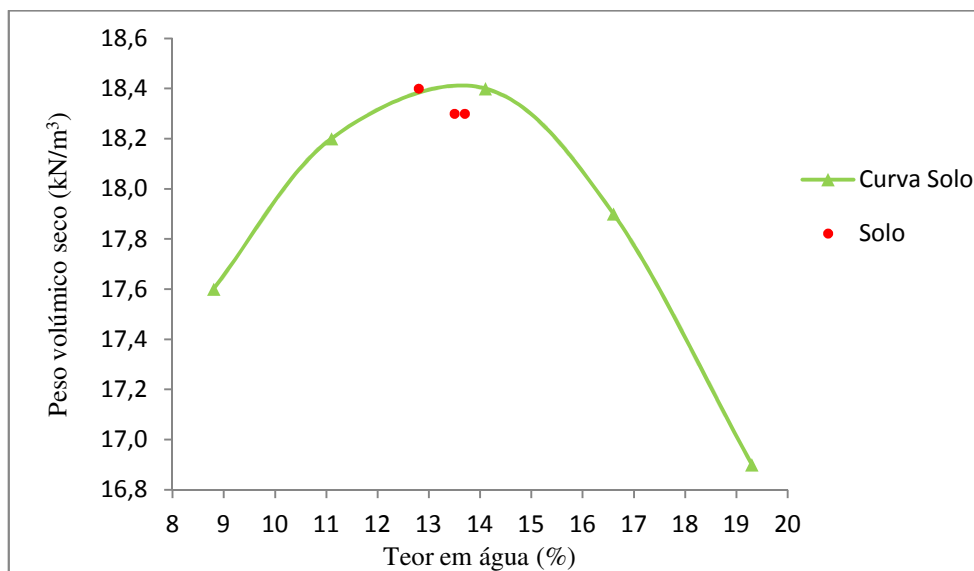


Figura 4.11 - Curva de compactação e provetes de solo

Quadro 4.5 - Características Provetes Solo

Proвете	w (%)	γ_d (kN/m ³)	Grau de compactação (%)	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Massa (g)
S – 1	13,5	18,3	99,5	102,3	117,3	1985
S – 2	13,7	18,3	99,5	102,3	117,2	1990
S – 3	12,8	18,4	100,0	102,2	117,9	1980

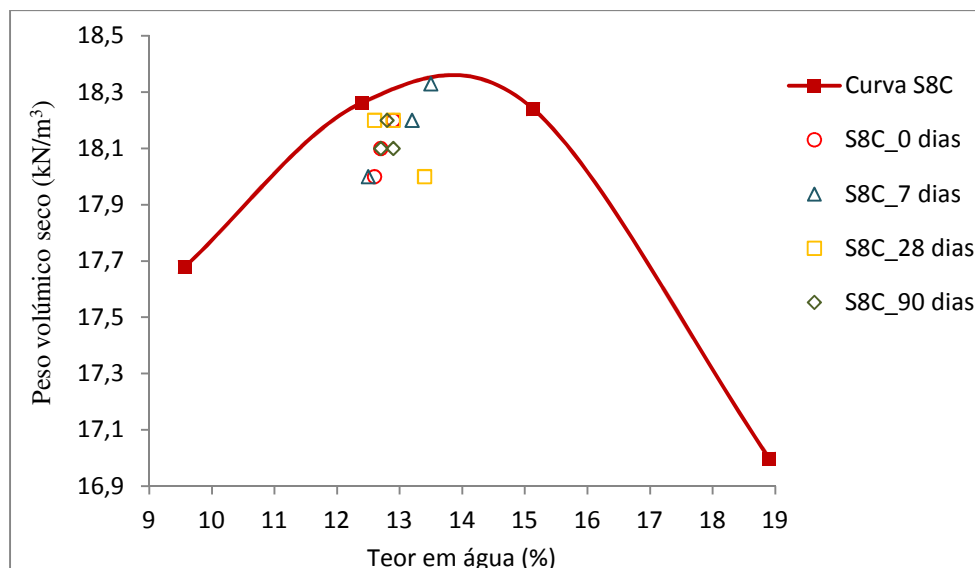


Figura 4.12 - Curva de compactação e provetes S8C

Quadro 4.6 - Características Provetes S8C

Dias de cura	Proвете	w (%)	γ_d (kN/m ³)	Grau de compactação (%)	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Massa (g)
0	S8C – 1	12,8	18,1	98,9	102,1	117,1	1955
	S8C – 2	12,9	18,2	99,5	102,2	117,2	1960
	S8C – 3	12,6	18,0	98,4	102,1	117,3	1940
7	S8C – 4	13,5	18,3	100,0	102,2	117,0	1985
	S8C – 5	13,2	18,2	99,5	102,2	117,1	1965
	S8C – 6	12,5	18,0	98,4	102,0	117,7	1940
28	S8C – 7	12,9	18,2	99,5	102,1	117,2	1965
	S8C – 8	13,4	18,0	98,4	102,1	117,3	1950
	S8C – 9	12,6	18,2	99,5	102,4	117,5	1955
90	S8C – 10	12,7	18,1	98,9	102,3	117,1	1945
	S8C – 11	12,9	18,1	98,9	102,1	117,0	1955
	S8C – 12	12,8	18,2	99,5	102,2	117,7	1960

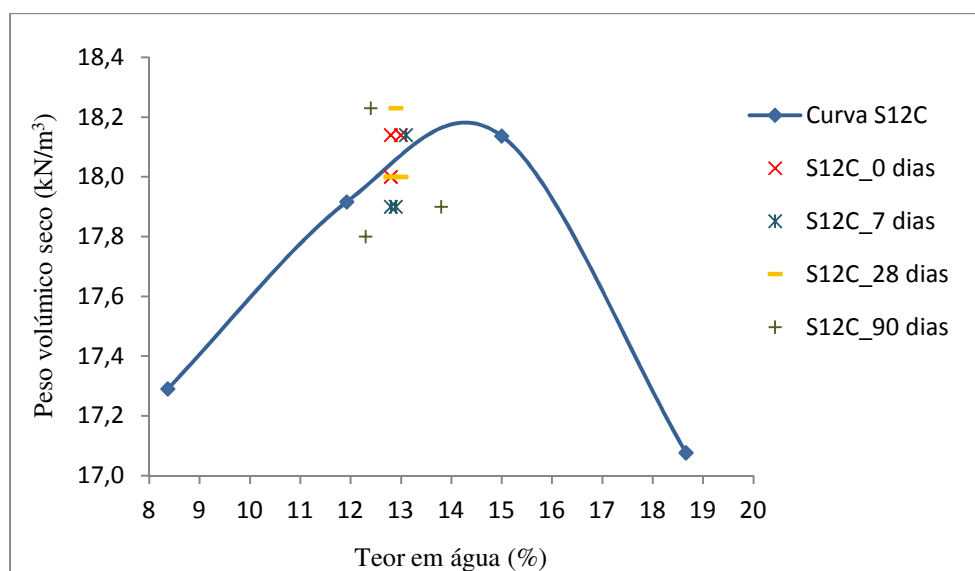


Figura 4.13 - Curva de compactação e provetes S12C

Quadro 4.7 - Características dos Provetes S12C

Dias de cura	Proвете	w (%)	γ_d (kN/m ³)	Grau de compactação (%)	Diâmetro (mm)	Altura (mm)	Massa (g)
0	S12C – 1	12,8	18,1	100,0	102,1	117,6	1950
	S12C – 2	12,8	18,0	99,4	102,1	117,5	1940
	S12C – 3	13,0	18,1	100,0	102,2	117,9	1955
7	S12C – 4	13,1	18,1	100,0	102,4	117,0	1955
	S12C – 5	12,9	17,9	98,9	101,5	117,0	1925
	S12C – 6	12,8	17,9	98,9	102,0	117,0	1930
28	S12C – 7	12,9	18,2	100,6	102,6	117,2	1960
	S12C – 8	13,0	18,0	99,4	102,4	117,1	1945
	S12C – 9	12,8	18,0	99,4	102,4	117,0	1940
90	S12C – 10	12,4	18,2	100,6	102,3	117,3	1960
	S12C – 11	12,3	17,8	98,3	102,3	117,2	1910
	S12C – 12	13,8	17,9	98,9	102,3	117,7	1945

Conforme se pode observar nas Figuras 4.12 e 4.13, os teores em água determinados em estufa dos provetes das misturas de solo com oito e doze por cento de cimento, ficaram ligeiramente abaixo do valor do teor em água óptimo pretendido. Este facto será explicado no próximo capítulo, onde se faz a análise dos resultados experimentais.

4.5 Ensaio de resistência à compressão simples

Foram realizados ensaios de resistência à compressão simples de modo a obter-se indicação em termos de resistência mecânica do solo estabilizado e do futuro comportamento do material em obra.

Para o ensaio foi utilizada a prensa hidráulica apresentada na Figura 4.14. Este ensaio permite determinar a resistência ou tensão de rotura e a deformação num provete de forma cilíndrica submetido a uma tensão normal nas bases. A preparação dos provetes deve ter um cuidado especial na rectificação da superfície das bases que irão sofrer compressão para garantir uma forma plana perfeita. Deve centrar-se o provete relativamente ao prato inferior e posicioná-lo de modo a que o carregamento aplicado seja exactamente perpendicular à base do provete.



Figura 4.14 - Ensaio de Resistência à Compressão Simples

O ensaio de resistência à compressão simples seguiu a especificação do LNEC E 264 - 1972 Solo-cimento - Ensaio de compressão, com as seguintes diferenças: foram utilizados neste trabalho provetes com 10,2 centímetros de diâmetro e 11,7 centímetros de altura, com uma relação altura/diâmetro (h/d) igual a 1,15 em vez da relação (h/d) igual a 2 como refere a norma. A outra diferença foi no processo de cura, em vez de utilizada a câmara húmida, os provetes foram acondicionados em sacos de plástico fechados de modo a evitar variações significativas de humidade.

A relação h/d igual a 2 fornece uma medida mais exacta de resistência à compressão simples do ponto de vista técnico, é a convencional para os provetes de betão uma vez que reduz as condições de esforço axial complexo que podem ocorrer durante a compressão de provetes com uma menor relação. Contudo, no ensaio de resistência à compressão simples de misturas de solo-cimento, os provetes com relação $h/d = 1,15$ são frequentemente utilizados (ACI 230, 1990).

Os provetes foram ensaiados à velocidade de 1 mm/min como indicado na especificação do LNEC E 264-1972. Durante a realização do ensaio foram anotados de 15 em 15 segundos os valores da força e do deslocamento lidos nos deflectómetros de modo a calcular-se as tensões registadas até à rotura do provete.

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

5.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos. Primeiro, é feita uma análise dos valores obtidos para o teor em água e peso volúmico seco dos provetes a ensaiar referindo a importância no solo-cimento das diferenças entre teor em água obtido por secagem em estufa e o teor em água calculado.

Seguidamente, são apresentados os resultados dos ensaios de resistência à compressão simples para os provetes de solo isolado e para as misturas de solo com cimento relativamente ao peso seco do solo, ou seja, as misturas com as designações S, S8C e S12C para os tempos de cura de 0,7, 28 e 90 dias, com o objectivo de avaliar o efeito da adição de cimento e do tempo de cura na resistência mecânica do solo em estudo.

5.2 Teores em água e pesos volúmcicos secos dos provetes de solo-cimento

Como foi referido no capítulo anterior (Figuras 4.12 e 4.13), os valores do teor em água dos provetes das misturas de solo-cimento (S8C e S12C) ficaram ligeiramente abaixo do valor do teor em água pretendido (teor em água óptimo obtido da curva compactação Proctor), devido à presa do cimento. Por este motivo pretende-se comparar aqueles valores obtidos por secagem em estufa, com os valores dos teores em água calculados a partir das quantidades de cimento e água usadas na moldagem dos provetes.

Nas Figuras 5.1 e 5.2 pode observar-se que, das curvas a “traço interrompido” para as curvas a cheio, há um deslocamento para a esquerda de cada ponto no teor em água e consequentemente uma subida no peso volúmico seco. Nestas Figuras, são apresentadas duas curvas de compactação para cada mistura, as curvas a “cheio” (já apresentadas nas Figuras 4.12 e 4.13) correspondem aos valores do teor em água obtidos a partir da pesagem em estufa e as curvas a traço interrompido, obtidas com teores em água calculado. Estas curvas, foram determinadas calculando-se o teor em água com as quantidades usadas na realização do Proctor e ajudam a explicar o facto de os valores dos teores em água obtidos para os provetes estarem ligeiramente abaixo do valor óptimo pretendido. Além destas duas curvas, estão também localizados em cada gráfico os pontos correspondentes ao teor em água e peso volúmico seco dos provetes de cada mistura.

Na determinação dos teores em água das misturas de solo-cimento por secagem em estufa, acontece que parte desta água corresponde à água de hidratação durante as reacções dos componentes principais do cimento. A água retida pelo cimento implica um peso de água livre menor o que implica

obter teores em água também menores. Assim, quando se realizaram os cálculos para as quantidades de água a juntar ao solo-cimento (de modo a obter-se o valor do teor em água ótimo) não se está a contar com a água necessária para a hidratação do cimento.

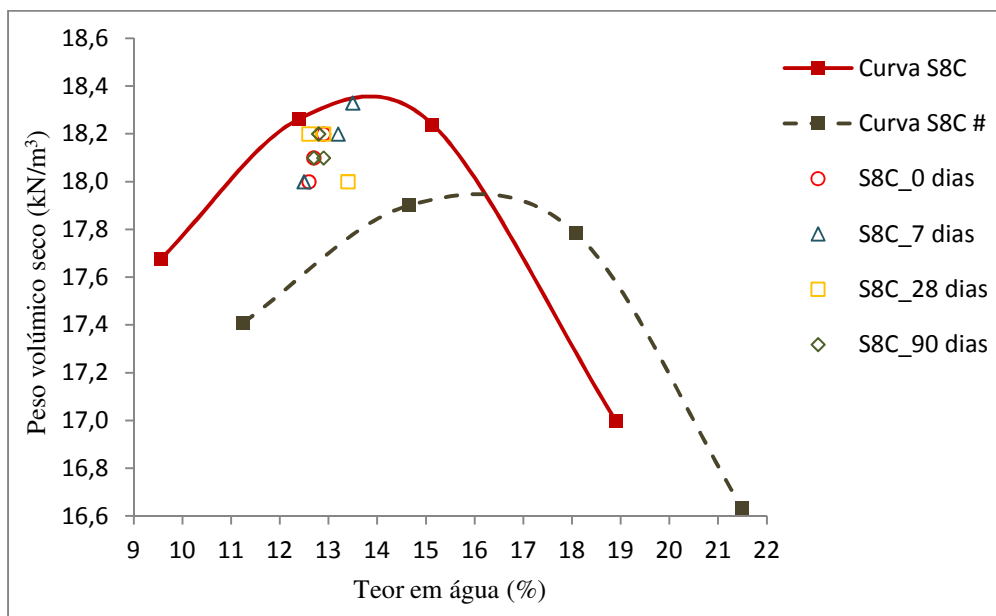


Figura 5.1 - Teores em água e peso volúmico seco dos provetes S8C

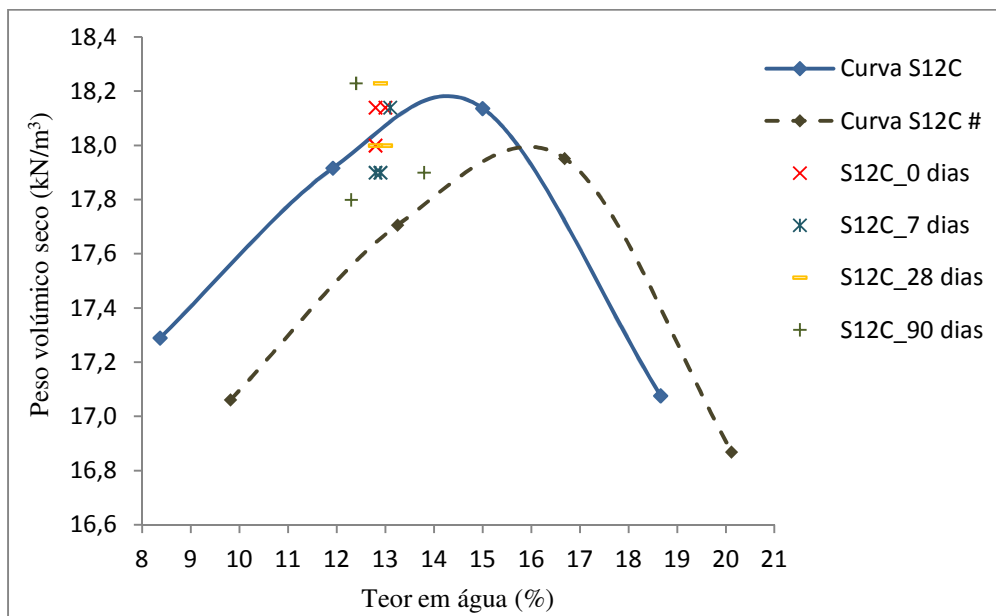


Figura 5.2 - Teores em água e peso volúmico seco dos provetes S12C

Para se obterem valores de teores em água mais próximos do ótimo, seria necessário obter uma curva de compactação com os valores dos teores em água calculados, a partir das quantidades de água adicionadas a cada provete na altura de efectuar a mistura. A partir desta curva poderá ser

determinado um teor em água ótimo calculado que deverá servir de base a uma estimativa mais real da quantidade de água a adicionar à mistura quer em laboratório e em obra.

5.3 Resistência à compressão simples

5.3.1 Introdução

Neste ponto são apresentados e analisados os gráficos e resultados obtidos correspondentes aos ensaios de resistência à compressão simples realizados segundo os procedimentos descritos no capítulo anterior.

Em primeiro lugar, são apresentados os gráficos obtidos e um Quadro com os valores máximos registados no conjunto de três provetes de solo isolado. Seguidamente, são apresentados para a mistura S8C e depois para a mistura S12C, os gráficos obtidos para cada conjunto de três provetes, ensaiados para os tempos de cura de 0,7, 28 e 90 dias. A seguir aos gráficos é apresentado um Quadro com os valores máximos registados para cada provete nos tempos de cura definidos.

Como critério de aceitação para os ensaios de resistência à compressão simples, estipulou-se que as resistências máximas individuais do conjunto de três provetes considerados idênticos (fabricados e curados do mesmo modo), não se deveriam afastar mais de 10% da resistência média desse conjunto.

Os registos de ensaios de todos os provetes ensaiados à compressão simples estão apresentados em anexo.

5.3.2 Provetes de solo

No caso dos provetes de solo não faz sentido falar em tempo de cura, visto que estes não levam adição de cimento portanto, o valor de resistência e deformação axial máxima, será sensivelmente o mesmo ao longo do tempo. Por este motivo, só foram moldados três provetes de solo e considerados os valores do ensaio de resistência à compressão simples realizados aos 0 dias, os mesmos que nos outros períodos de cura considerados.

A Figura 5.3 corresponde ao comportamento de cada um dos provetes de solo ensaiados.

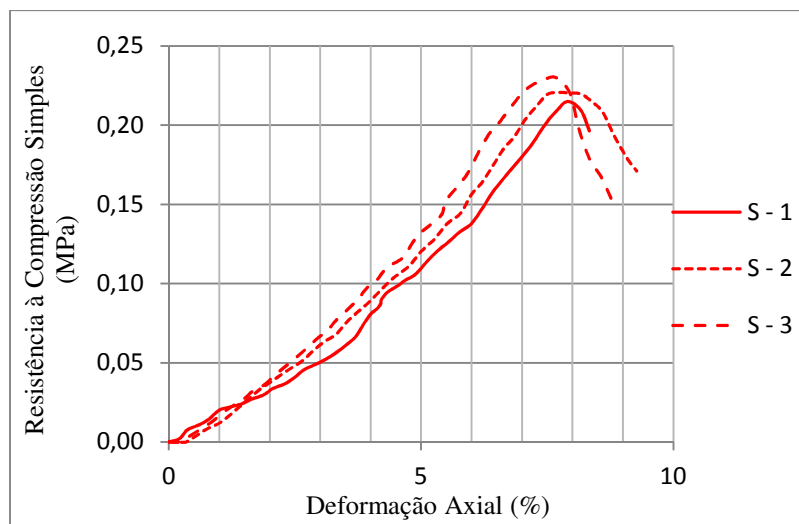


Figura 5.3 - Resistência à compressão simples dos provetes de solo

No Quadro 5.1 são apresentados os valores das resistências máximas (q_u em MPa) obtidas para cada provete, o desvio em percentagem de cada valor de resistência máxima em relação à média do conjunto de três provetes e a deformação axial máxima de cada provete.

Quadro 5.1 – Resistências e deformações máximas - provetes Solo

Proвете	q_u (MPa)	Desvio em relação q_u média (%)	Def. Axial (%)
S – 1	0,215	3,2	7,9
S – 2	0,221	0,6	7,7
S – 3	0,231	3,8	7,6

Na Figura 5.4 pode observar-se o tipo de rotura de um dos provetes de solo. Verificou-se que estes apresentaram um comportamento dúctil e sem planos de rotura bem definidos.



Figura 5.4 - Rotura do provete de solo

5.3.3 Provete com 8% de cimento

Nas Figuras 5.5 a 5.8, são apresentados os gráficos correspondentes ao conjunto de três provetes das misturas S8C para cada tempo de cura estipulado.

A Figura 5.5 corresponde aos gráficos com o comportamento de cada provete da mistura S8C ensaiado aos 0 dias de cura.

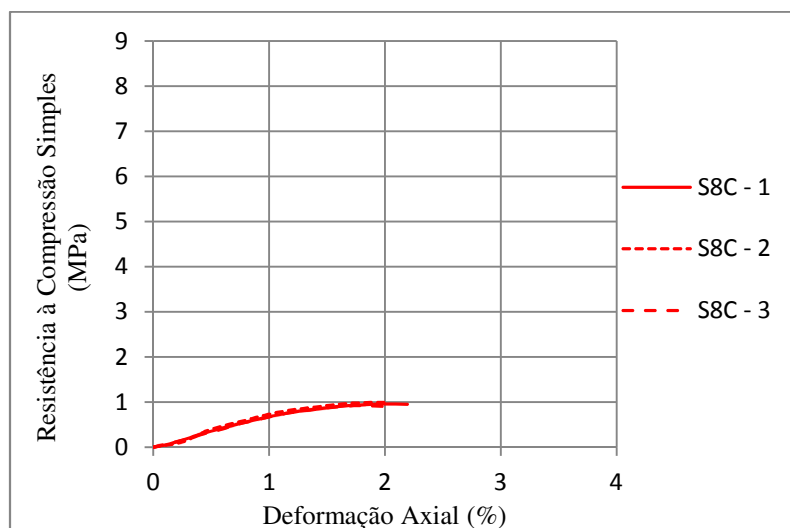


Figura 5.5 - Comportamento dos provetes S8C aos 0 dias de cura

A Figura 5.6 corresponde aos gráficos com o comportamento de cada provete da mistura S8C ensaiado aos 7 dias de cura.

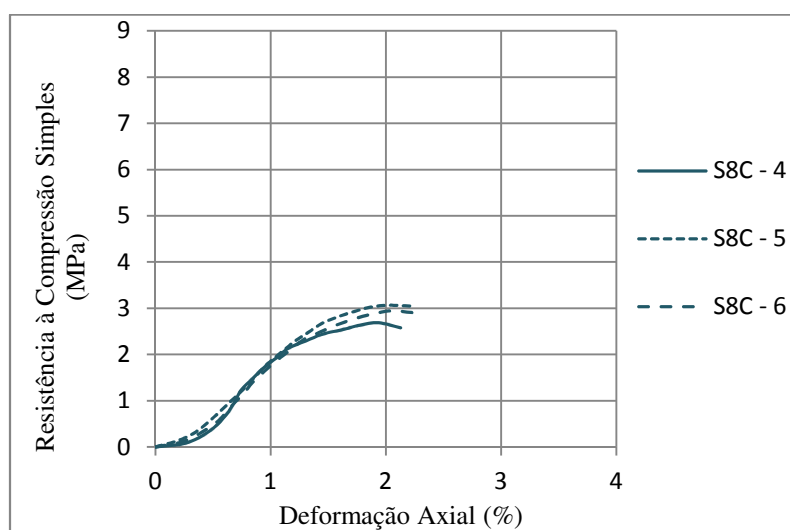


Figura 5.6 - Comportamento dos provetes S8C aos 7 dias de cura

A Figura 5.7 corresponde aos gráficos com o comportamento de cada provete da mistura S8C ensaiado aos 28 dias de cura.

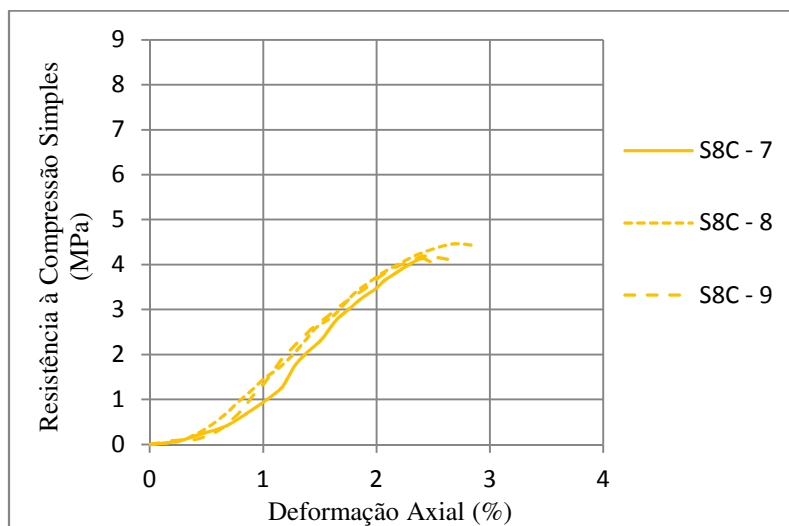


Figura 5.7 - Comportamento dos provetes S8C aos 28 dias de cura

A Figura 5.8 corresponde aos gráficos com o comportamento de cada provete da mistura S8C ensaiado aos 90 dias de cura.

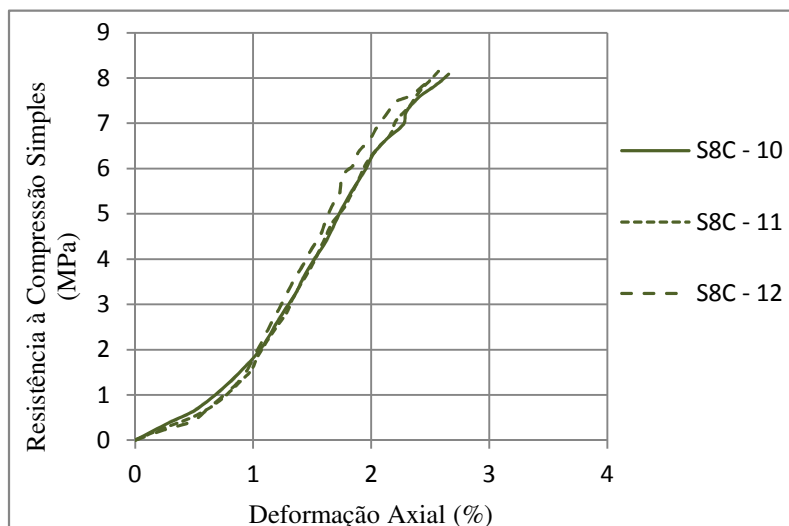


Figura 5.8 - Comportamento dos provetes S8C aos 90 dias de cura

No Quadro 5.2 são apresentados os valores obtidos a partir de cada gráfico para cada provete da mistura S8C: valores das resistências máximas (qu em MPa), o desvio da percentagem de cada

valor em relação à média do conjunto de três provetes para cada tempo de cura (%) e a deformação axial máxima (Def. Axial em %) de cada provete.

Quadro 5.2 – Resistências e deformações máximas - provetes S8C

Tempo de cura	Provete	f_{cu} (MPa)	Desvio em relação a f_{cu} média (%)	Def. Axial (%)
0 Dias	S8C – 1	0,957	0,1	2,0
	S8C – 2	0,992	3,7	2,0
	S8C – 3	0,920	3,8	1,8
7 Dias	S8C – 4	2,683	7,3	1,9
	S8C – 5	3,062	5,8	2,0
	S8C – 6	2,941	1,6	2,0
28 Dias	S8C – 7	4,133	3,0	2,4
	S8C – 8	4,464	4,7	2,7
	S8C – 9	4,189	1,7	2,4
90 Dias	S8C – 10	8,083	0,2	2,7
	S8C – 11	8,170	1,2	2,6
	S8C – 12	7,958	1,4	2,6

Na Figura 5.9, é apresentado um gráfico resumo com o comportamento de cada conjunto de três provetes da mistura S8C para os diferentes tempos de cura, de forma a poder comparar-se os resultados obtidos.

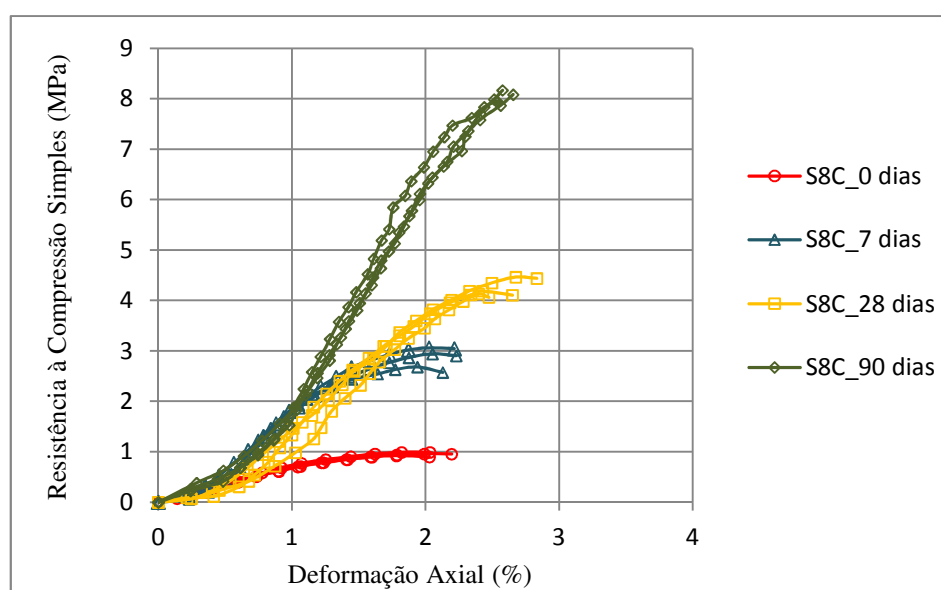


Figura 5.9 - Resistência à compressão simples dos provetes S8C aos 0, 7, 28 e 90 dias de cura

Pode verificar-se que, para a mistura de solo com 8% de cimento, o aumento da resistência aos 28 dias de cura, atingiu mais de 50% da resistência total adquirida pelos provetes aos 90 dias de cura. É durante os primeiros 28 dias que se dão com maior intensidade as reacções de hidratação do cimento. Após este período as reacções de hidratação continuam a dar-se, mas decrescendo continuamente. Os primeiros 7 dias de cura correspondem a um ganho de resistência 3 vezes superior em relação à mistura aos 0 dias, é sem dúvida o período de tempo onde há um ganho de resistência mais elevado mesmo correspondendo a um período menor.

A deformação axial máxima andou à volta do valor 2 a 3%, valor muito inferior à deformação apresentada pelos provetes de solo. Observou-se que a adição de cimento conduz a um aumento de resistência e a uma diminuição da deformação. É interessante observar que a deformação diminuiu com a adição do cimento quando comparada aos provetes de solo isolado, mas foi aumentando mesmo que muito ligeiramente com o aumento do tempo de cura, isto é, numa primeira fase diminui e com o aumento do tempo de cura a capacidade de deformação aumentou até que estabilizou para um valor de 2,5 a 2,6%.

Na Figura 5.10 pode observar-se o tipo de rotura dos provetes S8C aos 0, 7 e 28 dias de cura. Aos 90 dias os provetes ficaram completamente desintegrados. Verificou-se que estes apresentaram uma rotura mais repentina em relação aos provetes de solo isolado, ou seja, uma rotura frágil e com planos de rotura bem definidos. Este facto foi comprovado ao longo dos ensaios e quanto maior o tempo de cura mais acentuada se tornou a rotura.



Figura 5.10 – Modo de rotura dos provetes S8C aos 0, 7 e 28 dias de cura, respectivamente

5.3.4 Provetes com 12% de cimento

Nas Figuras 5.11 a 5.14, são apresentados os gráficos correspondentes ao conjunto dos três provetes das misturas S12C para cada tempo de cura.

A Figura 5.11 corresponde aos gráficos com o comportamento de cada provete da mistura S12C ensaiado aos 0 dias de cura.

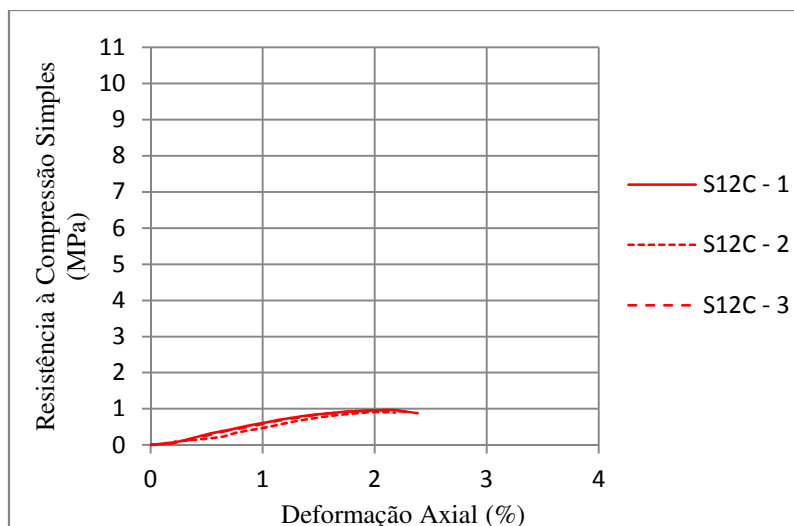


Figura 5.11 - Comportamento dos provetes S12C aos 0 dias de cura

A Figura 5.12 corresponde aos gráficos com o comportamento de cada provete da mistura S12C ensaiado aos 7 dias de cura.

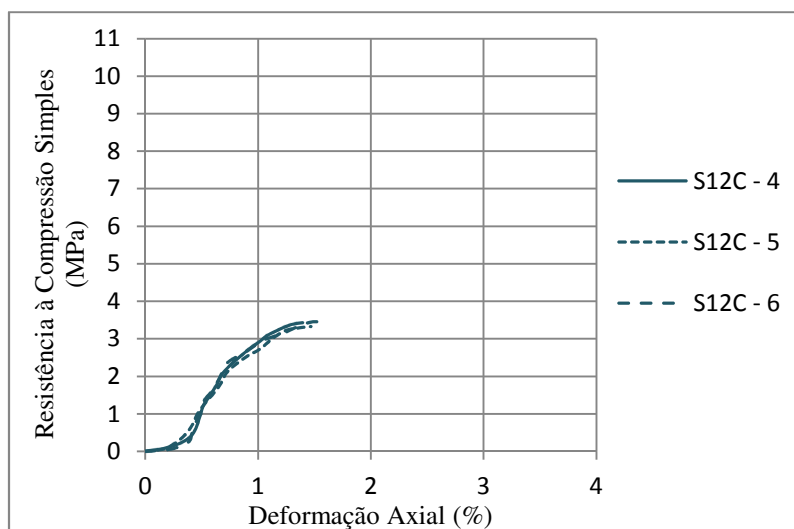


Figura 5.12 - Comportamento dos provetes S12C aos 7 dias de cura

A Figura 5.13 corresponde aos gráficos com o comportamento de cada provete da mistura S12C ensaiado aos 28 dias de cura.

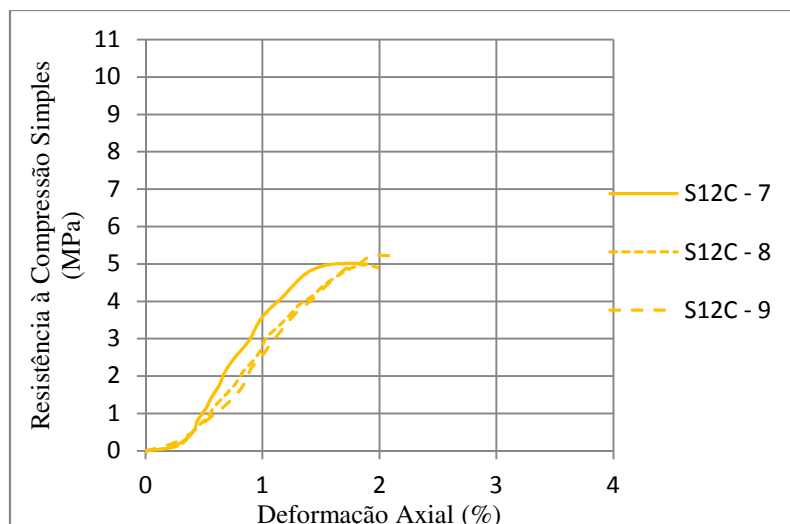


Figura 5.13 - Comportamento dos provetes aos 28 dias de cura

A Figura 5.14 corresponde aos gráficos com o comportamento de cada provete da mistura S12C ensaiado aos 90 dias de cura.

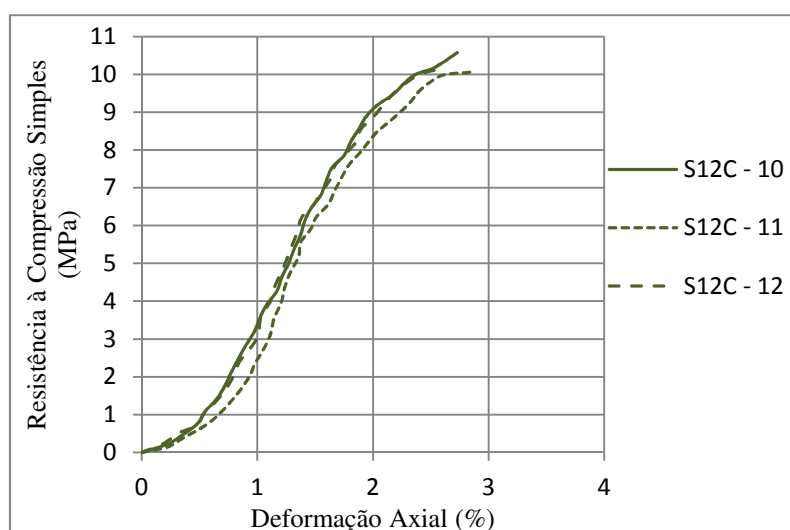


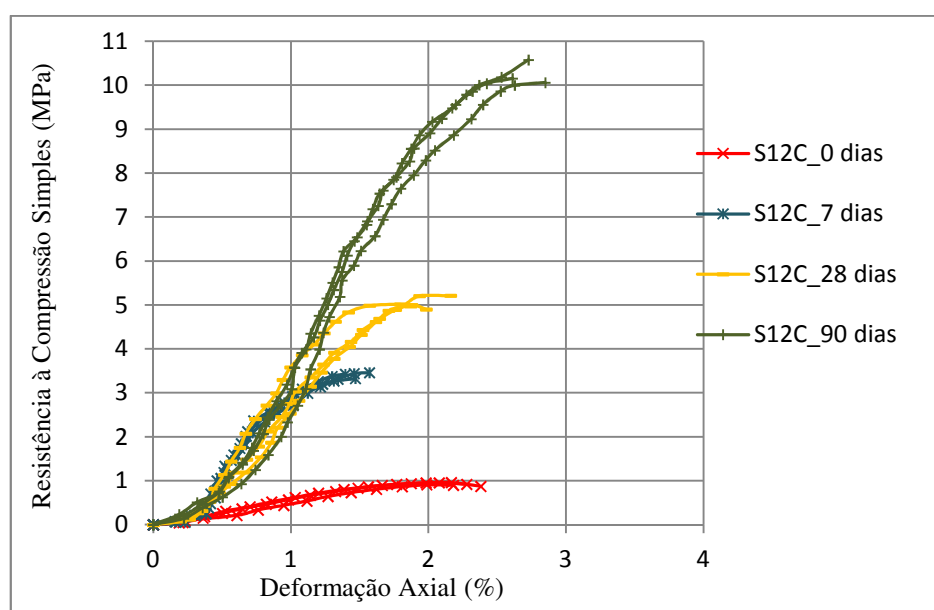
Figura 5.14 - Comportamento dos provetes aos 90 dias de cura

No Quadro 5.3 são apresentados os valores obtidos de cada gráfico para cada provete da mistura S12C: valores das resistências máximas (qu em MPa), o desvio da percentagem de cada valor em relação à média do conjunto de três provetes para cada tempo de cura (%) e a deformação axial máxima (Def. Axial em %) de cada provete.

Quadro 5.3 – Resistências e deformações máximas - provetes S12C

Tempo de cura	Provete	qu (MPa)	Desvio em relação a qu média (%)	Def. Axial (%)
0 Dias	S12C – 1	0,959	2,0	2,2
	S12C – 2	0,907	3,5	2,0
	S12C – 3	0,954	1,5	2,1
7 Dias	S12C – 4	3,426	0,6	1,4
	S12C – 5	3,326	2,3	1,5
	S12C – 6	3,460	1,6	1,6
28 Dias	S12C – 7	5,013	1,2	1,8
	S12C – 8	4,998	1,5	2,0
	S12C – 9	5,210	2,7	2,2
90 Dias	S12C – 10	10,577	3,1	2,7
	S12C – 11	10,058	2,0	2,9
	S12C – 12	10,155	1,1	2,5

Na Figura 5.15, é apresentado um gráfico resumo com o comportamento de cada conjunto de três provetes da mistura S12C para os diferentes tempos de cura, de forma a poder comparar-se os resultados obtidos.

**Figura 5.15 - Resistência à compressão simples dos provetes S12C aos 0,7, 28 e 90 dias de cura**

O gráfico apresentado permite verificar que, para a mistura de solo com 12% de cimento, o comportamento dos provetes é muito semelhante aos provetes da mistura de solo com 8% de cimento mas com valores de resistência máxima mais elevados registados durante o ensaio para os 7, 28 e 90

dias de cura. O aumento da resistência aos 28 dias de cura atingiu 50% da resistência total obtida aos 90 dias. O aumento da resistência durante os primeiros 7 dias de cura, corresponde a um ganho de 3,6 vezes superior em relação aos 0 dias de cura.

A deformação axial máxima andou à volta do valor 1,5 a 2,5% para as misturas S12C, valor muito inferior à deformação apresentada pelo solo isolado. Aos 0 dias, o valor foi de 2,1%, diminuindo depois para 1,5%, valor registado aos 7 dias, após este período e com o avançar do tempo, a deformação axial foi aumentando ligeiramente, atingindo o valor 2,7% aos 90 dias de cura.

Na Figura 5.16 pode-se observar o tipo de rotura dos provetes S12C aos 0, 7 e 28 dias de cura. Aos 90 dias os provetes ficaram completamente desintegrados. Observou-se o que já tinha sucedido com os provetes S8C, os provetes S12C apresentaram uma rotura frágil e planos de rotura bem definidos, e quanto maior o tempo de cura mais acentuada se tornou a rotura.



Figura 5.16 – Modo de rotura dos provetes S12C aos 0, 7 e 28 dias, respectivamente

5.4 Comparação dos resultados

5.4.1 Comparação entre as misturas S8C e S12C

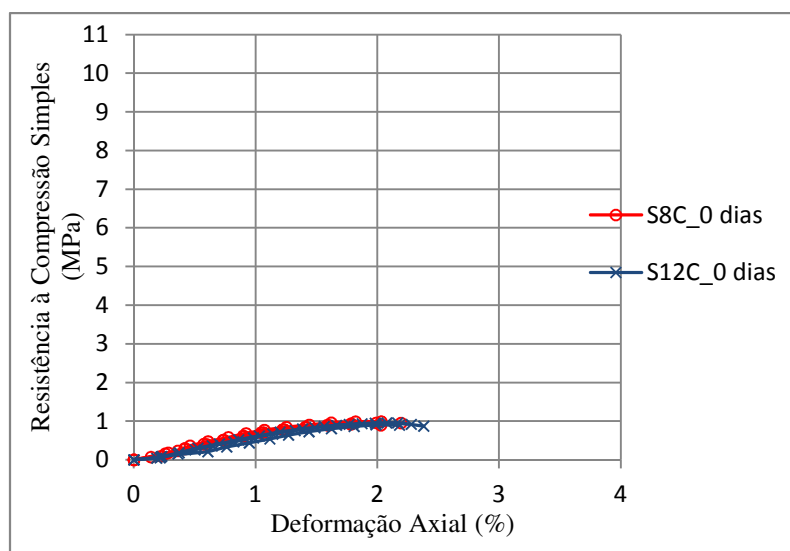
Neste ponto pretende-se comparar os gráficos e resultados apresentados anteriormente para o conjunto de provetes das misturas S8C e S12C em cada tempo de cura.

A partir dos Quadros 5.1, 5.2 e 5.3 apresentados atrás, foram calculadas as médias das resistências e deformações axiais máximas de cada conjunto. No Quadro 5.4 apresentam-se as médias calculadas das misturas S8C e S12C para cada tempo de cura. Calculou-se também a média para o conjunto de provetes de solo isolado, o valor é sempre o mesmo ao longo do tempo.

Quadro 5.4 – Média das resistências e deformações máximas de cada conjunto de provetes

Tempo de cura (dias)	Mistura	Resistência máxima média (MPa)	Deformação axial máxima média (%)
Solo		0,222	7,7
0	S8C	0,956	1,9
	S12C	0,940	2,1
7	S8C	2,895	2,0
	S12C	3,404	1,5
28	S8C	4,262	2,5
	S12C	5,074	2,0
90	S8C	8,070	2,6
	S12C	10,263	2,7

Na Figura 5.17 faz-se a comparação entre o conjunto de provetes da mistura S8C e S12C para os 0 dias de cura. Pretendeu-se utilizar sempre as mesmas cores e marcadores utilizados nos gráficos apresentados anteriormente, nesta Figura mudou-se da cor vermelha para cor azul nos provetes “S12C_0 dias”, pois o comportamento dos provetes é muito idêntico.

**Figura 5.17 - Comparação entre as misturas S8C e S12C aos 0 dias de cura**

Para os 0 dias de cura, os valores da resistência máxima registados para as misturas S8C e S12C, foram respectivamente 0,956 e 0,940 MPa. Comparativamente ao solo isolado em que foi registado o valor de 0,222 MPa houve um ganho de resistência. A adição do cimento, contribuiu desde

o momento inicial para este ganho de resistência. Os ensaios foram realizados cerca de 2h após a moldagem dos provetes portanto, não se pode atribuir este ganho de resistência às reacções de hidratação do cimento, visto que passou muito pouco tempo desde a adição deste e as diferentes quantidades de cimento adicionadas às misturas S8C e S12C conduziram praticamente aos mesmos valores de resistência máxima, verificando-se que é necessário algum tempo de cura, para que as diferentes quantidades de cimento comecem a aumentar a resistência.

A deformação axial das misturas S8C e S12C registaram um valor bastante inferior ao do solo, 1,9% para a mistura S8C e 2,1% para a mistura S12C.

Na Figura 5.18, faz-se a comparação entre o conjunto de provetes da mistura S8C e S12C para os 7 dias de cura.

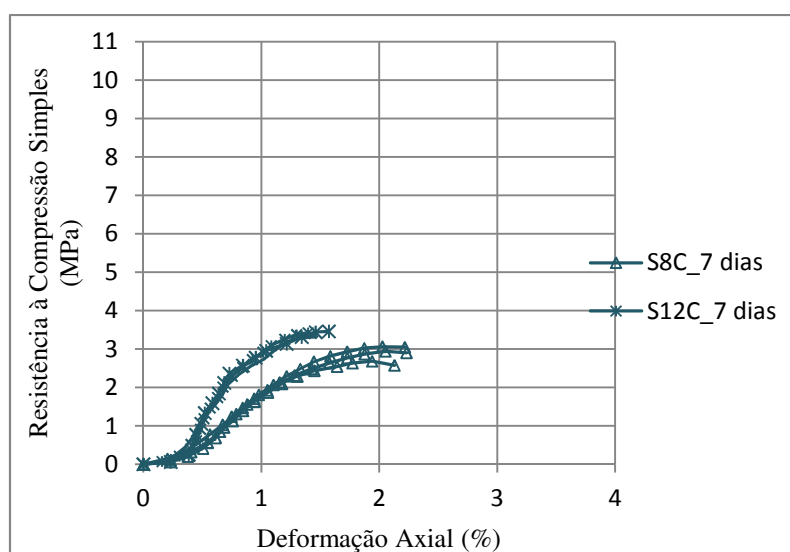


Figura 5.18 - Comparação das misturas S8C e S12C aos 7 dias de cura

Aos 7 dias de cura, obtiveram-se valores de resistência máxima de 2,895 e 3,404 MPa, para as misturas S8C e S12C, respectivamente. Enquanto aos 0 dias o valor era praticamente o mesmo para as duas misturas, aos 7 dias já se verificou o efeito das diferentes quantidades de cimento adicionados à mistura.

Os valores das deformações axiais máximas das misturas S8C e S12C foram os seguintes 2,0% para a mistura S8C e 1,5% para a mistura S12C. Enquanto para a mistura S8C o valor de deformação é muito parecido com o valor aos 0 dias, no caso da mistura S12C, a maior quantidade de cimento na mistura provocou um valor de deformação muito baixo.

Na Figura 5.19, faz-se a comparação entre o conjunto de provetes da mistura S8C e S12C para os 28 dias de cura.

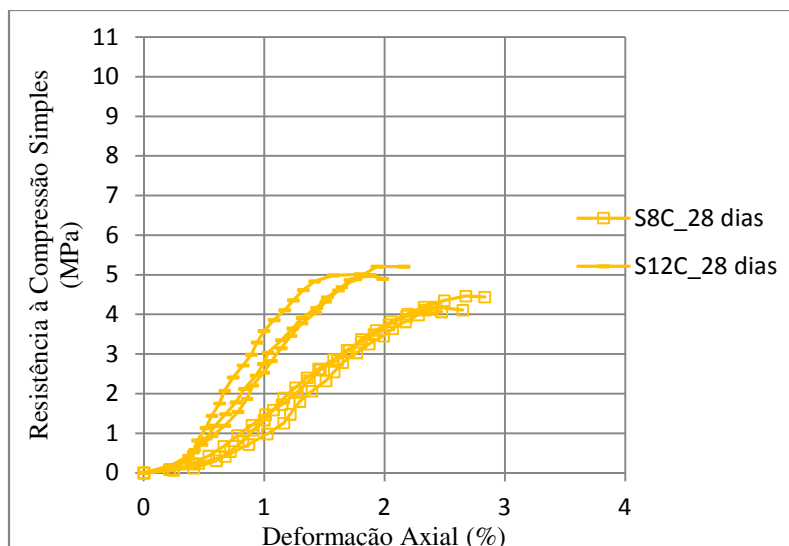


Figura 5.19 - Comparação das misturas S8C e S12C aos 28 dias de cura

Aos 28 dias de cura, obtiveram-se os seguintes valores de resistência máxima: para a mistura S8C o valor foi de 4,262 MPa e para a mistura S12C de 5,074 MPa. Consoante se pode verificar, com o avançar do tempo de cura, a diferença entre valores registados nos ensaios de resistência à compressão simples foi maior. Quanto à deformação axial, ambas as misturas de solo-cimento aumentaram relativamente aos 7 dias de cura, para a mistura S8C o valor foi de 2,5% e para a mistura S12C de 2,0%.

Na Figura 5.20, faz-se a comparação entre o conjunto de provetes da mistura S8C e S12C para os 90 dias de cura.

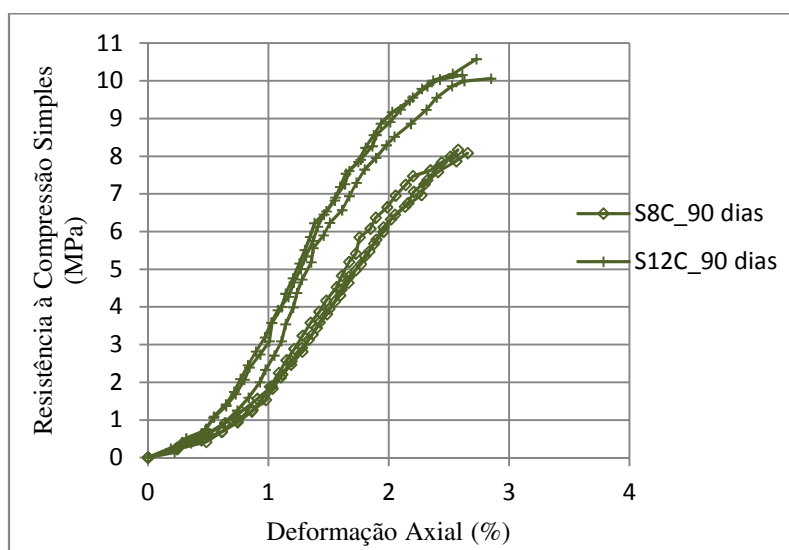


Figura 5.20 - Comparação das misturas S8C e S12C aos 90 dias de cura

Aos 90 dias de cura, os valores registados para as misturas S8C e S12C, foram respectivamente, 8,070 MPa e 10,263 MPa. Os valores de deformação para ambas as misturas ficaram muito próximos, 2,6% para a mistura S8C e 2,7% para a mistura S12C. Durante o ensaio de resistência à compressão simples aos 90 dias os provetes S8C e S12C quando romperam ficaram completamente desintegrados.

5.4.2 Efeito do teor em cimento

Na Figura 5.21 é apresentado um gráfico que relaciona as resistências máximas obtidas com a percentagem de cimento de cada mistura para cada tempo de cura de todos os provetes ensaiados.

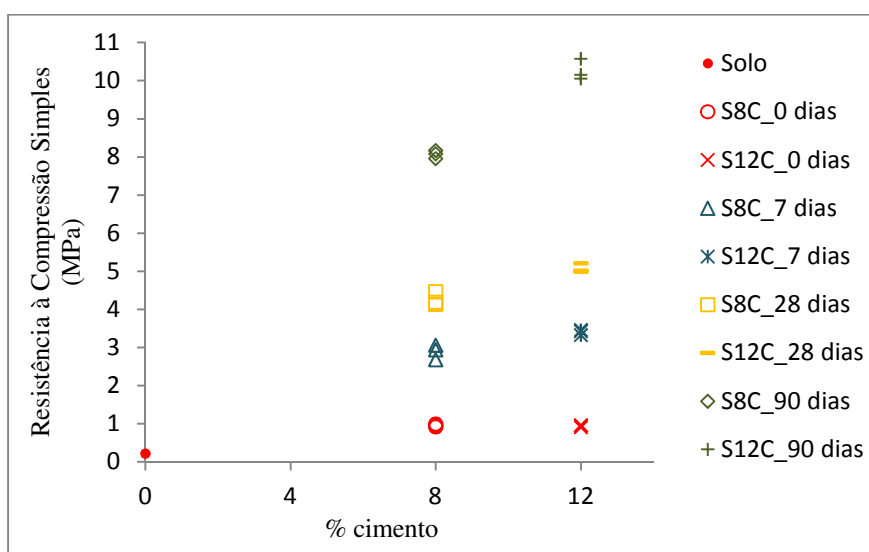


Figura 5.21 - Influência do teor em cimento

Pode observar-se no gráfico que aos 0 dias as resistências são praticamente as mesmas para as misturas S8C e S12C, aos 7 dias já se nota uma ligeira diferença cerca de 0,5MPa, aos 28 dias a diferença entre a mistura S8C e S12C é de aproximadamente 0,8MPa e aos 90 dias de cura a diferença tem o valor maior, o valor aproximado de 2 MPa. Relativamente ao solo isolado, as misturas S8C e S12C registaram valores maiores de resistência para qualquer tempo de cura.

Pretendeu-se estudar ainda o efeito do teor em cimento através da relação água/cimento nas resistências máximas. O facto de se terem analisado misturas com duas percentagens diferentes de cimento, não permitiu obter conclusões sobre essa relação. Para isso seriam necessárias mais misturas com percentagens de cimento diferentes.

5.4.3 Efeito do tempo de cura

No gráfico da Figura 5.22 apresentam-se as resistências máximas obtidas para cada provete em função do tempo de cura. Ao gráfico, foram adicionadas linhas de tendência que traduzem o crescimento da resistência ao longo de tempo para as misturas S8C e S12C. As linhas de tendência adicionadas correspondem a equações polinomiais de 2º grau que se ajustam melhor ao comportamento dos provetes ao longo do tempo de cura no intervalo dos 0 aos 90 dias.

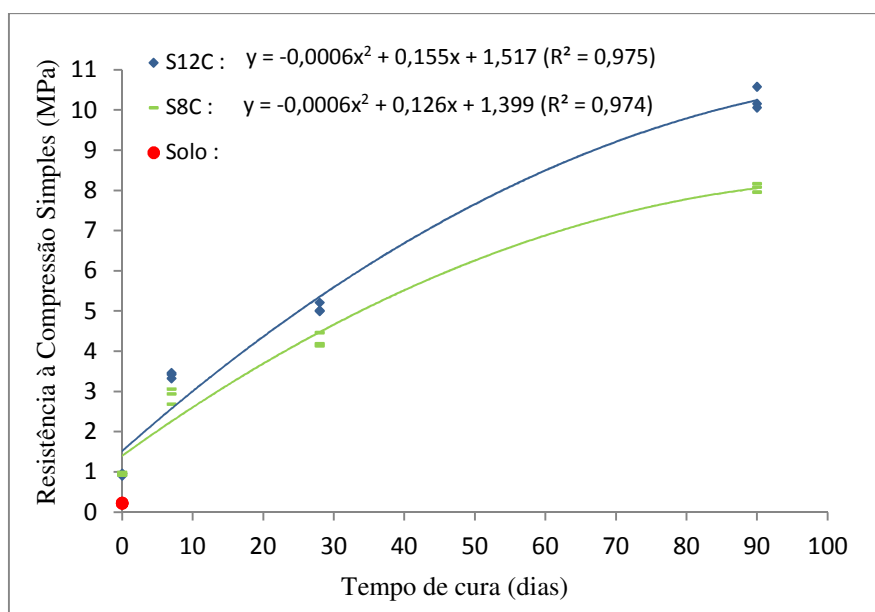


Figura 5.22 - Influência do tempo cura

Pode observar-se que, para o solo isolado ao longo do tempo de cura não houve uma variação na resistência à compressão simples, enquanto para as misturas S8C e S12C as linhas de tendência em função do tempo de cura, no intervalo de 0 a 90 dias, no início têm uma inclinação maior, o que corresponde a uma maior taxa de crescimento de resistência que, com o decorrer do tempo de cura a resistência tende para um valor limite, isto é, para um valor de resistência máxima, diminuindo assim de inclinação, que resulta na diminuição da taxa de crescimento de resistência.

Os 7 dias de cura iniciais são fundamentais para o ganho de resistência das misturas de solo-cimento, pois neste intervalo de tempo, que é o mais curto, verificou-se uma maior taxa de crescimento de resistência visto que grande parte das reacções de hidratação do cimento ocorre durante esse período.

5.5 Resistências máximas obtidas

Neste ponto pretende-se apresentar os valores obtidos no programa experimental realizado no presente trabalho e os valores obtidos por outros autores. Apresenta-se no Quadro 5.5 um resumo com os valores obtidos por cada um dos autores nos trabalhos apresentados no ponto 3.4, juntamente com os valores obtidos no presente trabalho. Todos os valores apresentados correspondem à média de 3 provetes nos ensaios de resistência à compressão simples para um tempo de cura de 7 dias. No Quadro é também apresentado o autor de cada trabalho, a origem do solo, classificação do solo, o cimento utilizado na mistura e as percentagens de cimento adicionadas. Estas foram sempre calculadas em relação à massa de solo seco.

Quadro 5.5 – Resistências máximas obtidas para cada mistura de solo-cimento dos diferentes trabalhos apresentados

Tempo de cura = 7 dias					
Trabalho	Solo	Classificação ASTM - solo	Tipo de cimento	% cimento	Resistência máxima (MPa)
Cruz, (2004)	Solo fabricado em laboratório	SC - Areia Argilosa	CP I - Cimento Portland normal	S0C	0,90
				S6C	3,60
				S10C	4,70
Muhuthan e Sariosseiri, (2008)	Solo de Aberdeen	ML - Silte de baixa plasticidade	CP I - Cimento Portland normal	S0C	0,21
				S2,5C	0,39
				S5C	0,53
				S7,5C	0,84
	Solo de Everett	SP - SM	CP I – Cimento Portland normal	S10C	1,74
				S0C	0,21
				S2,5C	0,37
				S5C	0,75
				S7,5C	1,20
	Solo de Palouse	ML - CL	CP I – Cimento Portland normal	S10C	1,82
				S0C	0,29
				S2,5C	0,38
				S5C	2,07
Foppa, 2005	Solo da formação de Botucatu	Areia fina siltosa	CP V – Cimento Portland de alta resistência inicial	S7,5C	4,87
				S10C	5,04
				S1C	0,71
				S2C	1,07
Presente trabalho, 2011	Solo da Costa	CL - Argila Magra	CP IV – Cimento Portland pozolânico	S3C	1,36
				S5C	2,24
				S7C	3,24
				S0C	0,22
				S8C	2,90
				S12C	3,40

Na Figura 5.23 apresenta-se um gráfico com os valores obtidos das resistências máximas apresentados no Quadro 5.5 para cada um dos trabalhos. Foram criadas nomenclaturas para todas as misturas apresentadas no Quadro 5.5 e Figura 5.23. Todas as nomenclaturas iniciam-se pela letra “S” que corresponde ao solo. Para designar a inclusão do cimento adoptou-se a letra “C” estando o valor da percentagem deste constituinte antes da respectiva letra de designação.

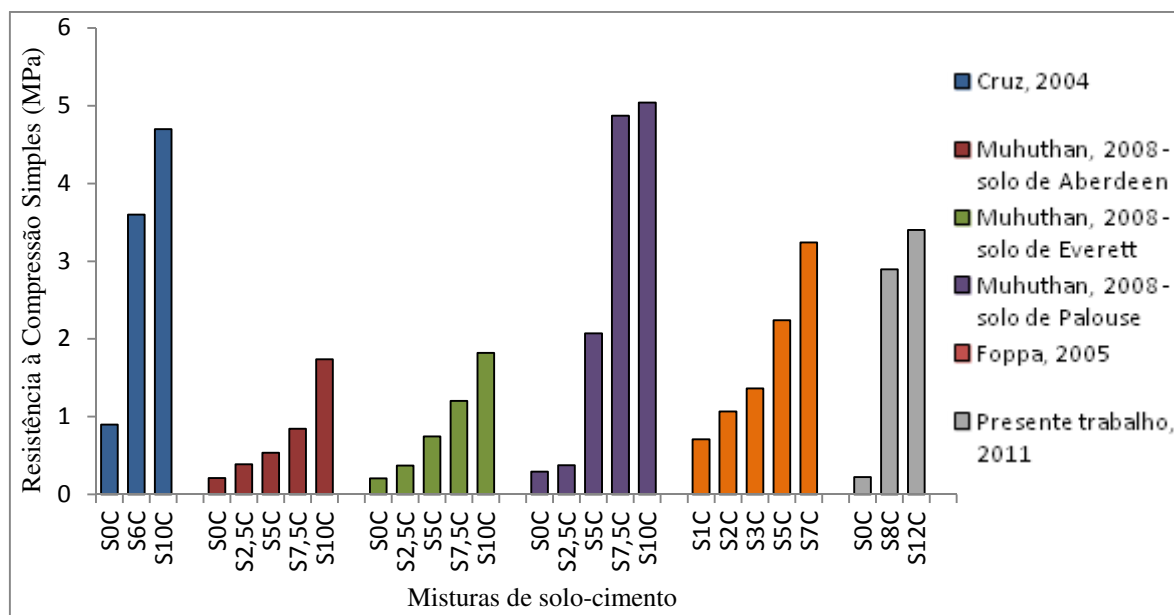


Figura 5.23 – Resistências máximas obtidas para cada mistura de solo-cimento dos diferentes trabalhos apresentados

Pode observar-se na Figura 5.23 que para todos os solos consoante o aumento da quantidade de cimento houve um aumento da resistência máxima. As resistências máximas obtidas no programa experimental realizado neste trabalho ficam “dentro” dos intervalos de resultados obtidos pelos outros autores. Como já foi referido no final do capítulo 3, apesar dos resultados apresentados serem todos para os 7 dias de cura é difícil compararem-se valores, uma vez que existem mais factores que influenciam o comportamento das misturas de solo-cimento, nomeadamente, as quantidades de cimento adicionadas às misturas, o tipo de cimento utilizado, o solo, os valores do teor em água e peso volúmico seco máximo.

5.6 Comportamento dos provetes

Neste ponto pretende-se mostrar o comportamento dos provetes do presente trabalho juntamente com os provetes realizados no trabalho de Muhunthan e Sariosseiri, 2008, durante o ensaio de resistência à compressão simples para os 7 dias de cura. Os gráficos a cor vermelha apresentados na Figura 5.24, correspondem à média dos gráficos anteriormente apresentados nas Figuras 5.3, 5.6 e

5.12, para o solo, solo com 8 e 12% de cimento, respectivamente. Os gráficos a cor preta e a cor verde correspondem aos gráficos das Figuras 3.3 – Solo de Aberdeen e Figura 3.5 – Solo de Palouse, para o solo e misturas de solo com 2,5, 5, 7,5 e 10% de cimento, realizados no trabalho de Muhunthan e Sariosseiri, 2008. Foram escolhidos estes dois solos, pois são os que têm características mais idênticas (classificação obtida) com o solo estudado no presente trabalho.

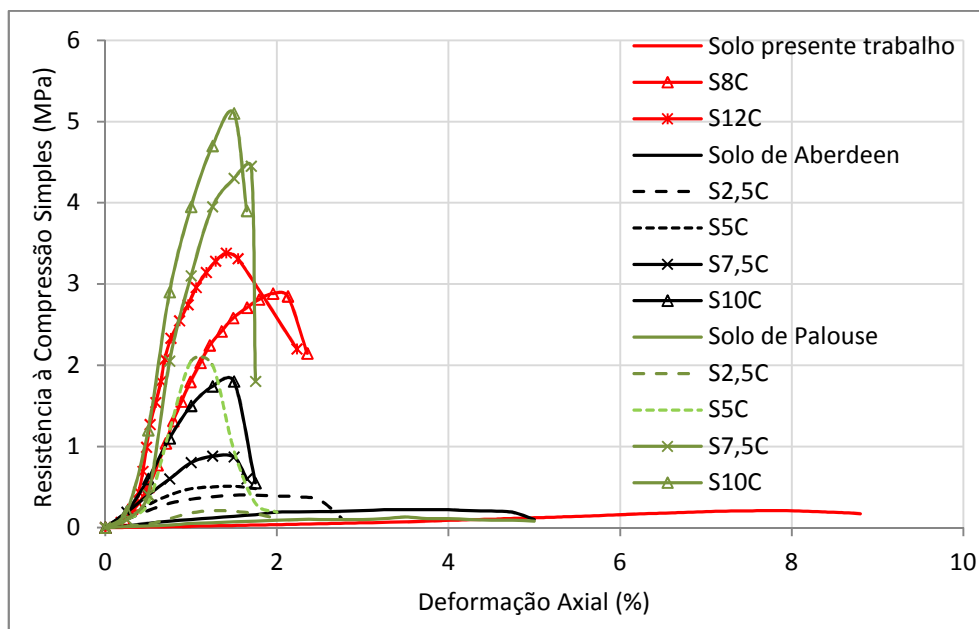


Figura 5.24 - Comportamento dos três solos aos 7 dias de cura

Pode observar-se na Figura 5.24 que o comportamento (andamento) dos provetes ao longo do ensaio de resistência à compressão simples é muito semelhante ao dos ensaios realizados no trabalho de Muhunthan e Sariosseiri, 2008. Os valores das resistências máximas obtidas variam para cada solo consoante a quantidade de cimento adicionada, podendo afirmar-se que para cada solo o aumento do teor em cimento provocou um aumento na resistência à compressão simples e uma diminuição na deformação axial.

6 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

6.1 Conclusões

Dos diferentes métodos de estabilização existentes, é na estabilização química que estão inseridas as misturas de solo-cimento. O solo-cimento é um material produzido pela mistura, compactação e cura dos materiais solo, cimento e água. A principal aplicação destas misturas é na construção de bases e sub-bases de pavimentos rodoviários. Esta dissertação visou estudar o comportamento mecânico de misturas de solo-cimento.

Para o efeito, estudou-se o comportamento do solo isolado e das misturas de solo com 8 e 12% de cimento em relação à massa de solo seco, para diferentes tempos de cura. Foram preparados provetes a partir do teor em água óptimo, obtido a partir do ensaio da compactação pesada em molde pequeno, para cada uma das misturas. O teor em água óptimo permitiu estimar a dosagem de água óptima com uma compacidade máxima que conduziu à resistência máxima dos provetes.

Posteriormente realizaram-se ensaios de resistência à compressão simples para cada uma das misturas e para cada tempo de cura estipulado. A análise dos resultados permitiu retirar as seguintes conclusões mais relevantes:

- o recurso ao uso do cimento para a estabilização de solos é um método que permite obter consideráveis melhorias nas características mecânicas do solo;
- nos ensaios de compactação, o aumento da percentagem de cimento adicionada ao solo, provocou um aumento do teor em água óptimo e uma diminuição do peso volúmico seco deste. A formação de núcleos interligados distribuídos pela massa de solo tendem a produzir um aumento no teor em água óptimo e uma diminuição no peso volúmico seco;
- nos provetes de solo-cimento, os teores em água obtidos por secagem em estufa são menores do que os reais devido ao processo de hidratação do cimento. Este efeito foi evidenciado, produzindo-se curvas de compactação a partir dos teores em água calculados com a água de amassadura de cada um dos provetes;
- a utilização de cimento, em percentagens de 8 ou 12%, permitiu obter melhorias consideráveis nas características mecânicas do solo analisado comparativamente ao solo sem qualquer tipo de tratamento;

- quanto maior a percentagem de cimento, maior a resistência obtida e os maiores ganhos de resistência dão-se durante os sete dias de cura iniciais. Aos 7 dias de cura, para a mistura S8C, obteve-se uma resistência aproximadamente 3 vezes superior à que se obteve aos 0 dias. Para a mistura S12C, obteve-se uma resistência cerca de 3,6 vezes superior em relação à que se obteve aos 0 dias. Por este motivo, em projectos que envolvam processos de estabilização de solos com cimento, devem respeitar-se todos os cuidados a ter na cura da mistura durante os 7 dias iniciais;
- nos ensaios de resistência à compressão simples o aumento da quantidade de cimento nas misturas provocou uma diminuição da deformação axial. O solo isolado registou uma deformação axial aproximada de 7,7%. Enquanto para as misturas S8C e S12C obtiveram-se deformações axiais máximas entre 1,9 e 2,6% para a mistura S8C e entre 2,1% e 2,7% para a mistura S12C;
- de uma forma geral, nas misturas S8C e S12C com o decorrer do tempo de cura registaram-se maiores valores de deformação axial. A excepção ocorreu para a mistura S12C, dos 0 para os 7 dias em que a valor da deformação axial máxima diminuiu;
- quanto ao tipo de rotura, os provetes constituídos só por solo apresentaram um comportamento dúctil atingindo maiores valores de deformação e não apresentaram planos de rotura bem definidos;
- para as misturas S8C e S12C obteve-se uma rotura sem aviso, observando-se um comportamento frágil. Nestes provetes houve pouca deformação e apresentaram planos de rotura bem definidos. Este comportamento foi evidenciado para maiores tempos de cura.

6.2 Desenvolvimentos futuros

Apresentam-se de seguida algumas sugestões que se julga serem pertinentes para o desenvolvimento futuro da investigação:

- seria de todo o interesse para comparação com outros trabalhos, a realização de um estudo com o solo utilizado neste trabalho, de modo a quantificar a influência da porosidade e do teor em água sobre a resistência mecânica das misturas de solo-cimento. A avaliação da adequação do uso das relações água/cimento na estimativa da sua resistência à compressão

simples. Para avaliação da porosidade seria necessário preparar “pontos de moldagem” com a mesma percentagem de cimento, mesmo teor em água e diferentes pesos volúmicos secos. Para avaliação da influência do teor em água e da relação água/cimento seria necessário preparar “pontos de moldagem” com o mesmo peso volúmico seco e com teores em água crescentes, fazendo variar as quantidades de cimento para cada ponto;

- realização de outras operações antes do ensaio de resistência à compressão simples, tais como imersão em água, secagem ao ar ou em estufa, ciclos alternados de molhagem e secagem, gelo/degelo referidas na Especificação E 264 do LNEC, solo-cimento – ensaio de compressão;
- avaliar até que ponto se justifica usar 12 em vez de 8% de cimento, chegando a valores reais de custos, tentando perceber qual seria a percentagem mais vantajosa em termos de resistências máximas/custos;
- estudar a estabilização do mesmo solo utilizado neste trabalho, mas com outro material que não fosse o cimento, como por exemplo a cal, de forma a poder compararem-se os valores de resistências máximas obtidas;
- utilizar aditivos juntamente com o cimento adicionado ao solo, como por exemplo, produtos reciclados, cloreto de cálcio, cloreto de sódio e hidróxido de sódio avaliando-se a contribuição destes em termos de resistência mecânica.

7 BIBLIOGRAFIA

ACI 230.1R-90 – *State-of-the-Art report on soil Cement*, ACI Material Journal, 87 (4), pgs. 402-403, 1990.

AL-AMOUNDI, O., Khan, K., Al-Kahtani, N. – *Stabilization of a Saudi calcareous marl soil*, Construction and Building Materials, pgs. 1848-1854, 2010.

BRANCO, F. – *Uso rodoviário de alguns subprodutos industriais*, Memória nº 720, LNEC, Lisboa, 1988.

CASTRO, E. – *Estabilização de solos*, Curso de especialização 108, LNEC, Lisboa, 1970.

CLOUGH, G., Rad, N., Bachus, R., and Sitar, N. – *Cemented sands under static loading*, Journal of the Geotechnical Engineering Division, pgs. 799-817, 1981.

CONSOLI, N., Foppa, D., Festugato, L., Heineck, K. – *Key paramaters for strength control of artificially cemented soils*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental, ASCE, pgs. 197-205, 2007.

CONSOLI, N., Fonseca, A., Cruz, R., Heineck, K. – *Fundamental parameters for the stiffness and strength control of artificially cemented sand*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, pgs. 1347-1353, 2009.

CONSOLI, N., Fonseca, A., Cruz, R. - *Strength Properties of Sandy Soil – Cement Admixtures*, Journal of Geotechnical and Geological Engineering, pgs. 681-686, 2009.

CRISTELO, N. – *Estabilização de solos residuais graníticos através da adição de cal*, Dissertação de Mestrado Departamento de Engenharia Civil Estruturas, Geotecnia e Fundações. Universidade do Minho, Guimarães – 2001.

CRISTELO, N, e Jalali, S. – *Estabilização de solos com cal*, Universidade do Minho, ISBN 978-989-95961-1-5, Guimarães, 2007.

CRUZ, M., – *Novas tecnologias da aplicação de solo-cimento*, Dissertação de Mestrado Departamento de Engenharia Civil Estruturas, Geotecnia e Fundações. Universidade do Minho, Guimarães, 2004.

CRUZ, M., Jalali, S. – *Melhoramento do desempenho de misturas solo-cimento*, 12º Congresso Nacional de Geotecnia, Guimarães, pgs. 639-648, 2010.

FERNANDES, J., Santos, J., Pinto, N. – *Contribuição para o estudo da combinação de cal com cimento no tratamento de solos*, 12º Congresso Nacional de Geotecnia, Guimarães, pgs. 397-406, 2010.

FERREIRA, C., Gomes and A., Jalali, S. – *Estudo de aditivos no desempenho mecânico de formulações laboratoriais de uma argila orgânica*, 12º Congresso Nacional de Geotecnia, Guimarães, pgs. 239-246, 2010.

FOPPA, D. - *Análise de variáveis chave no controle da resistência mecânica de solos artificialmente cimentados*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2005.

GOMES, A. Neves, J.M.C. - *Misturas de solos com ligantes hidráulicos e pozolânicos: Propriedades físico-químicas e mecânicas*, Lisboa, 1996.

HAMZAH, M. - *Conventional Methods for Highway Soil Stabilization*, a thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Civil Engineering of the University of Strathclyde, Glasgow, 1983.

INGLES, O. and Metcalf, J. B. – *Soil stabilization – Principles and practice*, Butterworths, Australia, 1972.

LIGHTSEY, G., Arman, A.; Callihan, C. D. - *Changes in the characteristics of cement-stabilized soils by addition of excess compaction moisture*, Highway Research Record, Soil Stabilization, Multiple Aspects, Washington, 1970.

LITTLE, D. – *Evaluation of Structural Properties of Lime Stabilized Soils and Aggregates*, Volume I: Summary of Findings, National Lime Association, 1999.

MUHUNTHAN, B., Sariosseiri, F. - *Effect of cement treatment on geotechnical properties of some Washington State soils*, Engineering Geology, Washington, pgs. 119-125, 2008.

NASCIMENTO, U. - *Estabilização de solos*, Curso de Especialização 108, LNEC, Lisboa, 1970.

NEVES, J. - *Estabilização de solos com cal. Estudo e aplicações rodoviárias*, Tese de Mestrado, Secção Autónoma de Geotecnia Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 1993.

NEVES, J. - *Construção e manutenção de infra-estruturas de transportes*, apontamentos teóricos do Instituto Superior Técnico, 2010.

NEVES, E. - *Estudo Laboratorial de Solos Tratados com Cal – Modelos de Comportamento*, Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2009.

PEREIRA, O. A. - *Estabilização de solos*, Curso de especialização 108, LNEC, Lisboa, 1970.

PINTO, N. - *Contribuição para o estudo da cal com cimento no tratamento de solos*, Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Geotécnica e Geoambiente, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2009.

PORTLAND Cement Association – PCA. *Soil Cement*, in www.cement.org/pavements, 2011.

SANTOS, M. - *Curso de solo-cimento*, 1976.

SANTOS, J. - *Estudo de formulação de Solo-Cimento e Solo-Cal e Respectivas Aplicações*, Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Geotécnica e Geoambiente, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2008.

SHERWOOD, P. – *Soil Stabilization with Cement and Lime – State of the art review*, Transport Research Laboratory, HMSO, London, 1995.

SILVA, M. – *Estudo Comparativo de dois solos argilosos estabilizados com cal*, Dissertação de Mestrado Departamento de Engenharia Geológica, Faculdade Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010.

SPECHT, L. - *Comportamento de misturas solo-cimento-fibra submetidas a carregamentos estáticos e dinâmicos visando a pavimentação*, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2000.

TERASHI, M. – *Brief State-of-the-Art*, 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hamburg, 1997.

WINTERKORN, H. – *Soil Stabilization*, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1975.

VAN IMPE, W. – *Soil Improvement Techniques and Their Evolution*, A. A Balkema, Rotterdam, BrookField, 1989.

ZHANG, Z. and Tao, M. - *Durability of cement stabilized low plasticity soils*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, pgs. 203-213, 2008.

Normas e Especificações

AASHTO M 145-42, *Specifications for Highway Materials*, American Association of State Highway and Transportation Officials.

ASTM D 558-82, *Standard Test Method for Moisture-Density Relations of Soil-Cement Mixtures*, American Society for Testing Materials.

ASTM D 559-82, *Standard Test Method for Wetting-and-Drying Tests of Compacted Soil-Cement Mixtures*, American Society for Testing Materials.

ASTM D 560-82, *Standard Test Method for Freezing-and-Thawing Tests of Compacted Soil-Cement Mixtures*, American Society for Testing Materials.

ASTM D 2487-00, *Standard Classifications of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*, American Society for Testing Materials.

IPQ – cimento, *Parte I: Composição, especificação e critérios de conformidade para cimentos correntes*, NP EN 197 – 1, Lisboa, 2001.

LNEC, E 196 – 1966, *Solos – Análise granulométrica*, Especificação LNEC, Lisboa, 1966.

LNEC, E 197 – 1966, *Solos – Ensaio de compactação*, Especificação LNEC, Lisboa, 1966.

LNEC, E 239 – 1970, *Solos – Análise granulométrica por peneiração húmida*, Especificação LNEC, Lisboa, 1970.

LNEC, E 243 – 1971, *Solo – Solo-cimento*, Especificação LNEC, Lisboa, 1971.

LNEC, E 262 – 1972, *Solo-cimento – Ensaio de compactação*, Especificação LNEC, Lisboa, 1972.

LNEC, E 264 – 1972, *Solo-cimento – Ensaio de compressão*, Especificação LNEC, Lisboa, 1972.

LNEC, E 304 – 1974, *Pavimentos rodoviários. Solo-cimento*, Especificação LNEC, Lisboa, 1974.

LNEC, NP - 143, *Solos – Determinação dos limites de consistência*, Norma portuguesa definitiva, Lisboa, 1969.

ANEXO

A.1 - Moldagem dos provetes

A.1.1 - Introdução

Neste ponto são apresentados os aparelhos, utensílios, materiais, o procedimento para a moldagem dos provetes e as quantidades finais utilizadas.

A.1.2 - Aparelhos, utensílios e materiais

No Quadro A.1 são apresentados os aparelhos e utensílios utilizados na moldagem dos provetes:

Quadro A.1 - Aparelhos e Utensílios

Molde pequeno Proctor	Molde cilíndrico de aço, com 102 mm de diâmetro interior e 117 mm de altura
Alonga	Cilindro de aço com o mesmo diâmetro interior do molde que lhe é anexado
Base	Base rectangular de aço que fecha inferiormente o molde
Pilão de compactação pesado	Tem 4,54 kg de massa, 457 mm de altura de queda e base de compactação de 50 mm de diâmetro

- Extractor de provetes
- Balanças
- Tabuleiros
- Espátulas, colheres de pedreiro e jardineiro
- Cápsulas
- Pás

Materiais:

- Solo

- Cimento
- Água

A.1.3 - Procedimento

Recolheu-se de forma manual com recurso a pás, a quantidade suficiente de solo para a realização do programa experimental deste trabalho. Esta amostra de solo, após ter sido recolhida, foi transportada e guardada em cima de uma bancada do laboratório de solos, espalhando-a numa camada pouco espessa para que secasse ao ar.

Desfizeram-se os torrões maiores com cuidado para não reduzir o tamanho natural das partículas e retiraram-se todos os restos de vegetação (pequenas raízes) que se encontravam na amostra de solo.

Retiraram-se duas amostras deste solo para uma cápsula e registou-se o peso destas (cápsula + solo húmido). As duas amostras foram colocadas 24h na estufa a uma temperatura de 100° C. Após este tempo foram retiradas e voltaram a ser pesadas, com o objectivo de determinar o valor do teor em água natural do solo, como no exemplo que se descreve no seguinte Quadro A.2:

Quadro A.2 - Determinação do teor em água do solo

	Cápsula 1	Cápsula 2
Peso da cápsula (g)	12,77	13,22
Cápsula + solo húmido (g)	53,07	56,76
Cápsula + solo seco (g)	51,79	55,63
Massa de solo seco (g)	39,02	42,41
Massa de água (g)	1,28	1,13
Teor em água (%)	3,3	2,7
Média (%)	3	

O valor da média era o valor adoptado para o teor em água natural do solo. Após ter sido determinado este valor e pretendendo-se um teor em água óptimo e um peso volúmico de valores iguais aos indicados no Quadro 4.4 - valores obtidos dos ensaios de compactação Proctor. Realizaram-se os cálculos necessários à determinação da quantidade exacta de água e cimento a adicionar ao solo no seu estado natural a colocar no molde, de modo a fabricarem-se provetes com o teor em água óptimo pretendido. Depois era realizada a compactação (com a mesma energia dos ensaios de compactação Proctor realizados anteriormente), de modo a obter-se o peso volúmico seco pretendido.

No quadro A.3 é apresentado um exemplo dos cálculos realizados para obtenção de cada uma das misturas, para o solo com um teor em água natural de 3%.

Quadro A.3 – Cálculos realizados para obtenção das misturas

Provete	% cimento	Tempo de cura - dias	w opt	Ww (g)	Ws (g)	Água adicionar (g)	Cimento (g)
S	0	0, 7, 28 e 90	0,131	58,3	1941,7	196,1	0
S8C	8	0, 7, 28 e 90	0,135	58,3	1941,7	224,8	155,3
S12C	12	0, 7, 28 e 90	0,141	58,3	1941,7	248,3	233,0

S – Solo

S8C – Solo com oito por cento de cimento

S12C – Solo com doze por cento de cimento

Os valores apresentados no Quadro 8.3 são a título de exemplo, pois teve-se o cuidado de medir sempre o teor em água natural do solo antes de se realizarem os cálculos, isto é, 24h antes da moldagem dos provetes eram colocadas na estufa duas cápsulas com as amostras do solo que ia ser utilizado para a moldagem no dia seguinte, de modo a saber-se o teor em água natural desse solo, visto que este foi recolhido no seu estado natural numa época de inverno (tempo muito húmido), tendo portanto tendência a perder água enquanto armazenado no laboratório, o que se verificou com a medição do teor em água natural do solo ao longo do tempo em que se iam fabricando os provetes.

A quantidade de cimento necessária para cada mistura foi calculada em relação à massa de solo seco utilizada e a quantidade de água em relação à soma das massas de solo seco e de cimento. A quantidade total da mistura permitia a moldagem de um provete e uma sobra para determinação do teor em água desse provete.

Após a pesagem das quantidades de material a adicionar, o solo, o cimento e a água eram misturados com o auxílio de uma espátula metálica, até que se obtivesse uma mistura homogênea. A ordem de mistura foi sempre a mesma. Ao solo era adicionado o cimento, estes eram misturados com o auxílio de uma espátula metálica até que a mistura adquirisse uma coloração uniforme. De seguida era adicionada a água continuando-se o processo de mistura até que a homogeneidade fosse obtida. Após a mistura dos materiais, esta era dividida em cinco camadas idênticas. Compactou-se cada uma destas camadas no molde pequeno, de maneira a atingir os valores de teor em água ótimo e peso volumico seco pretendidos.

Para a compactação de cada uma destas camadas de solo efectuaram-se as seguintes operações: apertava-se o molde à base com a alonga fixada; assentava-se o molde numa base rígida, deitava-se uma das camadas no molde e compactava-se o solo com 25 pancadas do pilão pesado, distribuídas uniformemente sobre a superfície; deitava-se no molde outra parte de solo para a camada

seguinte e compactava-se da mesma forma; repetiu-se a operação para a formação da quinta camada (a superfície desta deve exceder o bordo do molde, dentro da alonga, cerca de 1cm).

Seguidamente, retirava-se a alonga e rasava-se cuidadosamente o molde, preenchendo-se qualquer concavidade eventualmente formada com solo pertencente a essa amostra. Quando se rasava o molde colocavam-se em duas cápsulas amostras da mistura de modo a obter-se o teor em água do provete.

Concluído o processo de moldagem, o provete era imediatamente extraído do molde, sua massa e medidas (diâmetro e altura) devidamente anotados, e acondicionado num saco plástico adequadamente identificado e vedado para evitar variações significativas do teor em água.

A.1.4 - Quantidades finais

No Quadro A.4 estão contabilizados o total de provetes fabricados para os ensaios de compactação Proctor e para os ensaios de resistência à compressão simples.

Quadro A.4 - Número total de provetes realizados				
Provetes	0 Dias	7 Dias	28 Dias	90 Dias
Proctor	13			
S	3	-	-	-
S8C	3	3	3	3
S12C	3	3	3	3
Total	9	6	6	6

No total foram realizados quarenta provetes, treze para o ensaio de compactação Proctor, dos quais cinco provetes para o solo e quatro provetes para cada mistura S8C e S12C. Os restantes provetes foram fabricados para o ensaio de resistência à compressão simples, três provetes de solo isolado, e doze provetes para cada mistura S8C e S12C.

No Quadro A.5 é apresentada a quantidade total de solo utilizada para a moldagem dos provetes para os ensaios de compactação Proctor e para os ensaios de resistência à compressão simples de cada mistura para os diferentes tempos de cura.

Quadro A.5 - Quantidade total de solo

Solo	0 Dias	7 Dias	28 Dias	90 Dias
Proctor (kg)	26			
S (kg)	6	-	-	-
S8C (kg)	6	6	6	6
S12C (kg)	6	6	6	6
Total (kg)	18	12	12	12

No total, para a moldagem dos provetes foram utilizados aproximadamente 80 kg de solo.

No Quadro A.6 é feita a contabilização da quantidade de cimento utilizada em cada conjunto de provete três provetes, os valores apresentados no Quadro são para o exemplo do teor em água natural do solo de 3%, pois a quantidade de cimento, calculada em relação à massa de solo seco variou consoante o teor em água natural do solo, alterando assim ligeiramente as quantidades de cimento. No entanto, os valores andaram sempre a volta das quantidades apresentadas.

Quadro A.6 - Quantidade total de cimento

	0 Dias	7 Dias	28 Dias	90 Dias
S (g)	-	-	-	-
S8C (g)	465,9	465,9	465,9	465,9
S12C (g)	699,0	699,0	699,0	699,0
Total (g)	1164,9	1164,9	1164,9	1164,9

No total foram utilizados 4659,6 g de cimento para a fabricação dos provetes. Para a realização dos ensaios de compactação Proctor das misturas S8C e S12C foram utilizados, 621,2 g e 932 g de cimento, respectivamente.

A.2 - Registo dos ensaios de resistência à compressão simples

A.2.1 - Introdução

Neste ponto serão apresentados os registos de cada provete nos ensaios de resistência à compressão simples do solo isolado e das misturas S8C e S12C para os diferentes tempos de cura. Os valores foram registados de 15 em 15 segundos durante o ensaio do provete.

A.2.2 - Registo de ensaios – provetes de solo

No Quadro A.7 são apresentados os registos de ensaio correspondentes aos gráficos dos provetes S-1, S-2 e S-3 no ensaio de resistência à compressão simples.

Quadro A.7 - Registo de ensaio provetes Solo

Proвете S - 1		Proвете S - 2		Proвете S - 3	
Deformação (%)	Tensão (kPa)	Deformação (%)	Tensão (kPa)	Deformação (%)	Tensão (kPa)
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,2	2,0	0,2	0,9	0,2	1,3
0,4	7,7	0,4	2,3	0,4	4,1
0,6	10,5	0,6	4,0	0,6	8,2
0,8	14,1	0,7	8,1	0,8	12,3
1,0	20,1	1,0	11,2	1,0	17,2
1,2	22,0	1,2	16,0	1,2	22,2
1,4	24,0	1,4	22,0	1,5	26,1
1,6	26,9	1,6	27,9	1,7	31,9
1,9	29,9	1,8	33,8	1,9	35,7
2,1	33,8	2,0	38,1	2,1	41,4
2,3	36,5	2,3	43,2	2,3	47,1
2,5	40,4	2,5	47,5	2,5	52,6
2,7	45,5	2,7	51,3	2,7	59,1
2,9	48,5	2,9	58,3	3,0	65,6
3,1	51,8	3,1	63,7	3,1	70,0
3,3	56,1	3,3	67,8	3,3	77,4
3,5	60,9	3,5	75,5	3,5	83,6
3,7	66,1	3,7	82,0	3,7	89,8
3,9	74,5	4,0	88,8	3,9	97,0
4,0	80,9	4,2	96,3	4,1	102,1
4,1	84,4	4,5	103,5	4,3	110,1
4,2	87,2	4,8	110,9	4,6	116,1
4,2	89,9	5,0	120,2	4,8	126,0
4,3	94,7	5,3	128,0	5,0	132,0
4,5	97,8	5,5	138,0	5,4	142,9
4,7	102,0	5,8	144,4	5,5	151,7
4,9	106,0	6,0	156,3	5,7	161,6
5,1	113,9	6,2	164,0	5,9	169,5
5,3	120,6	6,4	174,6	6,2	183,5
5,5	126,1	6,6	185,5	6,4	194,6
5,8	132,3	6,8	192,7	6,6	202,6
6,0	137,7	7,1	203,5	7,0	218,8
6,2	147,4	7,3	212,4	7,2	225,2

A.8 - Registo de ensaio de provetes Solo (continuação)

Provete S - 1		Provete S - 2		Provete S - 3	
Deformação (%)	Tensão (kPa)	Deformação (%)	Tensão (kPa)	Deformação (%)	Tensão (kPa)
6,4	158,2	7,5	219,5	7,4	228,4
6,7	169,6	7,7	220,8	7,6	230,5
6,9	178,1	7,9	220,3	7,7	229,0
7,2	188,8	8,2	219,7	7,9	224,8
7,4	199,8	8,4	214,8	8,0	217,0
7,7	208,9	8,6	208,3	8,1	197,8
7,9	214,9	8,8	193,4	8,3	178,7
8,2	209,2	9,1	178,8	8,6	167,1

A.2.3 - Registo de ensaios – provetes S8C

No Quadro A.9 são apresentados os valores registados nos ensaios de resistência à compressão simples dos provetes S8C aos 0 dias de cura.

Quadro A.9 - Registo de ensaio provetes S8C - 0 dias de cura

Provete S8C - 1		Provete S8C - 2		Provete S8C - 3	
Deformação (%)	Tensão (kPa)	Deformação (%)	Tensão (kPa)	Deformação (%)	Tensão (kPa)
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,1	73,2	0,2	97,4	0,3	158,5
0,3	182,6	0,4	234,9	0,4	284,0
0,4	299,9	0,5	364,2	0,6	401,0
0,6	404,6	0,6	476,8	0,7	509,6
0,7	517,1	0,8	584,9	0,9	609,7
0,9	621,1	0,9	684,7	1,1	709,5
1,0	700,7	1,1	772,2	1,2	784,7
1,2	783,9	1,3	847,0	1,4	843,5
1,4	846,6	1,4	905,5	1,6	894,1
1,6	901,1	1,6	959,9	1,8	920,4
1,8	939,3	1,8	989,9	2,0	898,2
2,0	957,3	2,0	991,7	2,3	788,3
2,2	955,3	2,3	841,9	2,5	687,0

No Quadro A.10 são apresentados os valores registados nos ensaios de resistência à compressão simples dos provetes S8C aos 7 dias de cura.

Quadro A.10 - Registo de ensaio provetes S8C - 7 dias de cura

Provete S8C - 4		Provete S8C - 5		Provete S8C - 6	
Deformação (%)	Tensão (kPa)	Deformação (%)	Tensão (kPa)	Deformação (%)	Tensão (kPa)
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,2	60,7	0,2	141,6	0,2	109,6
0,4	198,0	0,4	323,2	0,4	320,3
0,5	411,6	0,5	524,7	0,5	563,0
0,6	685,6	0,6	774,1	0,6	849,6
0,7	959,2	0,7	1026,9	0,8	1127,8
0,7	1240,1	0,8	1307,6	0,8	1393,1
0,8	1472,2	0,9	1559,5	0,9	1629,5
0,9	1707,6	1,0	1806,4	1,1	1869,3
1,1	1926,6	1,1	2065,0	1,2	2096,7
1,2	2132,1	1,2	2290,9	1,3	2310,5
1,3	2289,0	1,3	2480,2	1,4	2479,6
1,4	2436,3	1,4	2668,5	1,6	2636,0
1,6	2544,7	1,6	2812,2	1,7	2768,1
1,8	2632,0	1,7	2927,5	1,9	2866,9
1,9	2682,6	1,9	3022,4	2,1	2941,4
2,1	2575,8	2,0	3061,9	2,2	2903,3
		2,2	3045,6		

No Quadro A.11 são apresentados os valores registados nos ensaios de resistência à compressão simples dos provetes S8C aos 28 dias de cura.

Quadro A.11 - Registo de ensaio provetes S8C - 28 dias de cura

Provete S8C - 7		Provete S8C - 8		Provete S8C - 9	
Deformação (%)	Tensão (kPa)	Deformação (%)	Tensão (kPa)	Deformação (%)	Tensão (kPa)
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,2	72,6	0,2	69,1	0,2	89,0
0,5	235,6	0,4	223,1	0,4	117,5
0,7	416,3	0,5	425,4	0,6	308,0
0,9	716,3	0,7	671,6	0,7	542,1
1,0	983,3	0,8	945,6	0,8	797,8
1,2	1256,7	0,9	1206,9	0,9	1078,6
1,2	1478,9	1,0	1467,6	1,0	1333,5
1,3	1802,2	1,1	1723,2	1,1	1587,9
1,4	2063,8	1,3	2030,6	1,2	1889,0
1,5	2320,4	1,4	2329,8	1,3	2153,0
1,6	2551,6	1,5	2596,5	1,4	2402,1
1,7	2781,8	1,6	2841,3	1,5	2628,1
1,8	3030,7	1,7	3090,7	1,6	2861,1
1,9	3253,1	1,8	3371,4	1,7	3097,0
2,0	3453,5	1,9	3598,9	1,8	3303,8
2,1	3638,9	2,1	3821,7	1,9	3487,7
2,2	3814,6	2,2	4011,5	2,0	3741,5
2,3	3985,2	2,3	4188,9	2,2	3958,3
2,4	4132,5	2,5	4348,6	2,3	4112,2
2,5	4064,2	2,7	4464,1	2,4	4189,2
		2,8	4439,7	2,7	4108,2

No Quadro A.12 são apresentados os valores registados nos ensaios de resistência à compressão simples dos provetes S8C aos 90 dias de cura.

Quadro A.12 – Registo de ensaio provetes S8C - 90 dias de cura

Provete S8C – 10		Provete S8C - 11		Provete S8C - 12	
Deformação (%)	Tensão (kPa)	Deformação (%)	Tensão (kPa)	Deformação (%)	Tensão (kPa)
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,3	382,9	0,2	263,1	0,2	222,1
0,5	628,0	0,4	460,8	0,5	415,4
0,6	916,6	0,6	686,4	0,6	684,7
0,8	1220,7	0,7	935,6	0,7	973,9
0,9	1556,6	0,9	1229,3	0,9	1262,8
1,0	1892,1	1,0	1530,5	0,9	1547,2
1,1	2206,8	1,0	1831,0	1,0	1879,6
1,2	2561,0	1,1	2130,8	1,1	2247,6
1,3	2919,4	1,2	2467,2	1,2	2582,9
1,4	3268,7	1,3	2810,8	1,2	2885,8
1,4	3593,0	1,3	3129,3	1,3	3236,2
1,5	3949,6	1,4	3440,1	1,4	3578,5
1,6	4306,0	1,5	3806,7	1,4	3871,3
1,7	4641,3	1,6	4140,7	1,5	4165,4
1,7	4976,0	1,6	4460,5	1,6	4522,4
1,8	5350,0	1,7	4797,2	1,6	4827,3
1,9	5676,5	1,8	5133,9	1,7	5193,0
2,0	5995,3	1,8	5470,2	1,7	5415,6
2,0	6324,0	1,9	5784,0	1,8	5847,6
2,1	6659,2	2,0	6116,2	1,8	6076,9
2,3	6968,4	2,1	6443,8	1,9	6367,0
2,3	7253,9	2,2	6754,8	2,0	6643,9
2,4	7582,6	2,2	7054,5	2,1	6953,7
2,6	7867,7	2,3	7364,7	2,1	7241,0
2,7	8083,2	2,4	7709,1	2,3	7471,9
		2,5	7990,6	2,4	7623,1
		2,6	8170,4	2,5	7835,4
				2,5	7958,0

A.2.4 - Registo de ensaios - provetes S12C

No Quadro A.13 são apresentados os valores registados nos ensaios de resistência à compressão simples dos provetes S12C aos 0 dias de cura.

Quadro A.13 - Boletim de ensaio provetes S12C – 0 dias de cura

Proвете S12C - 1		Proвете S12C - 2		Proвете S12C - 3	
Deformação (%)	Tensão (kPa)	Deformação (%)	Tensão (kPa)	Deformação (%)	Tensão (kPa)
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,2	77,1	0,2	42,2	0,2	52,7
0,4	186,4	0,2	93,0	0,4	149,7
0,5	307,6	0,6	210,0	0,5	258,6
0,7	412,0	0,8	334,5	0,6	363,1
0,9	520,3	0,9	438,5	0,8	467,2
1,0	620,0	1,1	538,3	1,0	567,0
1,2	719,5	1,3	641,6	1,1	670,4
1,4	802,4	1,4	728,5	1,3	757,4
1,6	865,0	1,6	807,0	1,5	832,1
1,8	919,1	1,8	865,3	1,7	894,5
2,0	953,0	2,0	907,4	1,9	936,4
2,2	959,2	2,2	897,3	2,1	954,4
2,4	873,7	2,4	871,6	2,3	920,7
2,7	617,5	2,6	723,1	2,6	700,2
3,0	509,0	2,9	527,7	2,9	591,7

No Quadro A.14 são apresentados os valores registados nos ensaios de resistência à compressão simples dos provetes S12C aos 7 dias de cura.

Quadro A.14 - Registo de ensaio provetes S12C - 7 dias de cura

Provete S12C - 4		Provete S12C - 5		Provete S12C - 6	
Deformação (%)	Tensão (kPa)	Deformação (%)	Tensão (kPa)	Deformação (%)	Tensão (kPa)
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,2	72,8	0,2	61,6	0,2	61,0
0,3	209,9	0,3	221,7	0,4	247,7
0,4	387,2	0,4	443,0	0,4	482,6
0,4	612,7	0,4	701,0	0,4	765,6
0,5	914,7	0,5	999,7	0,5	1056,3
0,5	1188,4	0,5	1285,7	0,5	1334,1
0,6	1465,5	0,6	1562,8	0,6	1591,1
0,6	1738,2	0,7	1818,6	0,6	1843,4
0,7	2014,9	0,7	2086,4	0,7	2119,3
0,8	2290,6	0,8	2337,2	0,7	2365,7
0,8	2521,4	0,9	2546,6	0,8	2571,3
0,9	2728,0	1,0	2725,9	1,0	2776,9
1,0	2917,9	1,1	2991,6	1,0	2957,2
1,1	3088,0	1,2	3199,8	1,2	3137,7
1,2	3256,5	1,3	3270,9	1,3	3313,5
1,3	3377,0	1,5	3326,4	1,5	3439,9
1,4	3425,6	1,7	3048,5	1,6	3459,6
1,6	3214,4			1,7	3386,1

No Quadro A.15 são apresentados os valores registados nos ensaios de resistência à compressão simples dos provetes S12C aos 28 dias de cura.

Quadro A.15 - Registo de ensaio provetes S12C - 28 dias de cura

Provete S12C - 7		Provete S12C - 8		Provete S12C - 9	
Deformação (%)	Tensão (kPa)	Deformação (%)	Tensão (kPa)	Deformação (%)	Tensão (kPa)
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,2	76,5	0,3	120,9	0,2	193,5
0,3	265,5	0,4	313,8	0,4	435,0
0,4	522,4	0,4	578,6	0,5	716,3
0,4	819,5	0,5	871,4	0,6	929,1
0,5	1136,1	0,6	1187,5	0,7	1193,0
0,6	1440,5	0,7	1483,1	0,8	1537,1
0,6	1752,3	0,8	1782,2	0,9	1869,2
0,7	2072,2	0,8	2121,2	0,9	2211,9
0,7	2407,2	0,9	2454,8	1,0	2534,0
0,8	2713,4	1,0	2747,7	1,1	2820,1
0,9	2987,4	1,0	3031,7	1,1	3144,8
0,9	3293,8	1,1	3351,7	1,2	3460,8
1,0	3579,5	1,2	3643,7	1,3	3776,1
1,1	3859,9	1,3	3913,6	1,4	4047,2
1,2	4107,7	1,4	4164,4	1,5	4322,3
1,2	4355,8	1,5	4433,1	1,6	4611,8
1,3	4618,9	1,6	4685,8	1,7	4869,1
1,4	4833,3	1,8	4889,3	1,8	4997,5
1,6	4984,7	1,9	4998,0	1,9	5207,2
1,8	5013,0	2,0	4901,6	2,2	5210,0
1,9	4968,0				

No Quadro A.16 são apresentados os valores registados no ensaio de resistência à compressão simples dos provetes S12C aos 90 dias de cura.

Quadro A.16 - Registo de ensaio provetes S12C - 90 dias de cura

Provete S12C - 10		Provete S12C - 11		Provete S12C - 12	
Deformação (%)	Tensão (kPa)	Deformação (%)	Tensão (kPa)	Deformação (%)	Tensão (kPa)
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,2	222,4	0,2	141,6	0,2	234,3
0,4	476,5	0,4	383,7	0,3	508,2
0,5	758,7	0,5	625,1	0,5	721,5
0,5	1088,5	0,6	926,6	0,5	1058,9
0,6	1410,1	0,7	1247,8	0,6	1371,9
0,7	1747,5	0,8	1588,4	0,7	1684,5
0,8	2084,5	0,9	2001,7	0,8	2065,5
0,8	2449,0	1,0	2329,5	0,8	2392,9
0,9	2812,9	1,0	2709,4	0,9	2736,1
1,0	3188,9	1,1	3089,7	1,0	3084,4
1,0	3580,5	1,1	3536,8	1,0	3570,8
1,1	3910,2	1,2	3988,7	1,1	3994,3
1,2	4265,2	1,2	4367,7	1,1	4348,2
1,2	4647,3	1,3	4724,6	1,2	4757,9
1,3	5005,7	1,4	5184,2	1,3	5151,8
1,3	5342,8	1,4	5559,7	1,3	5505,3
1,4	5752,9	1,5	5896,6	1,3	5859,0
1,4	6125,6	1,5	6229,9	1,4	6220,5
1,5	6451,7	1,6	6565,4	1,5	6538,9
1,6	6824,1	1,7	6940,3	1,6	6904,4
1,6	7183,9	1,7	7294,3	1,6	7256,5
1,6	7535,2	1,8	7645,7	1,7	7603,8
1,7	7849,4	1,9	7953,2	1,8	7906,5
1,8	8222,2	2,0	8289,7	1,9	8265,7
1,9	8555,5	2,0	8516,4	1,9	8561,8
1,9	8865,3	2,2	8862,1	2,0	8907,3
2,0	9169,8	2,3	9230,7	2,1	9239,0
2,2	9477,4	2,4	9554,9	2,2	9556,0
2,3	9785,3	2,5	9861,1	2,3	9858,3
2,4	10006,3	2,6	9996,3	2,4	10036,8
2,5	10183,6	2,8	10057,5	2,6	10154,5
2,7	10576,8				

Tratamento de solos com cimento para obtenção de melhores características mecânicas
João José da Fonseca Marques Simões Dias

